

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ**

**LAÍS KOOP**

**MODELO DE DUAS FASES, TRANSIENTE E BI-DIMENSIONAL PARA  
SIMULAÇÃO DA SECAGEM DE ERVA MATE (*Ilex paraguariensis*) EM SECADOR  
CONTÍNUO DE CAMADA ESPESSA**

**Curitiba**

**2014**

**LAÍS KOOP**

**MODELO DE DUAS FASES, TRANSIENTE E BI-DIMENSIONAL PARA  
SIMULAÇÃO DA SECAGEM DE ERVA MATE (*Ilex paraguariensis*) EM SECADOR  
CONTÍNUO DE CAMADA ESPESSA**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos da Universidade Federal do Paraná, como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Alimentos.

Orientador: Prof. Dr. Everton Fernando Zanoelo

Co-orientador: Prof. Dr. Fernando Augusto Pedersen Voll

**Curitiba**

**2014**

---

K82m

Koop, Lais

Modelo de duas fases, transiente e bi-dimensional para simulação da secagem de erva mate (*ilex paraguariensis*) em secador contínuo de camada espessa. [manuscrito] / Lais Koop. – Curitiba, 2014.

80f. : il. [algumas color.] ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Alimentos, 2014.

Orientador: Everton Fernando Zanoelo -- Co-orientador: Fernando Augusto Pedersen Voll

1. Erva mate. 2. Secagem. I. Universidade Federal do Paraná. II. Zanoelo, Everton Fernando. III. Voll, Fernando Augusto Pedersen. IV. Título.

CDD: 663.96

---

LAÍS KOOP

**MODELO DE DUAS FASES, TRANSIENTE E BI-DIMENSIONAL  
PARA SIMULAÇÃO DA SECAGEM DE ERVA-MATE (*Ilex  
paraguariensis*) EM SECADOR CONTÍNUO DE CAMADA  
ESPESSA**

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos, da Universidade Federal do Paraná, pela Comissão formada pelos professores:

Orientador:

  
Prof. Dr. ÉVERTON FERNAND ZANOELO  
Setor de Tecnologia, UFPR

  
Prof. Dr. FÁBIO BENTES FREIRE  
Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, UFSCAR

  
Prof. Dr. MARCELO KAMINSKI LENZI  
Setor de Tecnologia, UFPR

Curitiba, 06 de março de 2014.

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus, por ter me dado a capacitação para realizar este trabalho.

Ao prof. Dr. Éverton Fernando Zanoelo, pela contribuição com seus conhecimentos e sugestões na orientação deste trabalho.

Ao prof. Dr. Fernando Augusto Pedersen Voll, pela colaboração com informações essenciais na concretização deste trabalho.

Aos meus pais, Egon Koop e Corina Löwen Koop, pelo apoio que me deram e por permitirem que todo esse trabalho pudesse ser realizado.

À Loyse Tussolini, pela ajuda na realização dos experimentos.

Às minhas amigas Caroline Goltz, Cíntia Tiemi Misugi e Érika de Castro Vasques pela amizade e carinho durante esse período de trabalho.

Ao Eduardo Machado e Juliana de Souza Machado por todo apoio, conselho e orações.

À todos que direta ou indiretamente contribuíram para a conclusão desta pesquisa.

*“Assim diz o SENHOR: “Não se glorie o sábio em sua sabedoria nem o forte em sua força nem o rico em sua riqueza, mas quem se gloriar, glorie-se nisto: em compreender-me e conhecer-me, pois eu sou o SENHOR e ajo com lealdade, com justiça e com retidão sobre a terra, pois é dessas coisas que me agrado”, declara o SENHOR.”*

*(Jr 9:23-24, NVI)*

## RESUMO

Um modelo de duas fases para representar a secagem de erva-mate em um secador contínuo de camada espessa foi proposto. O modelo foi essencialmente obtido por balanços de massa do soluto na fase fluida e sólida, e energia em ambas as fases. A temperatura e umidade de ambas as fases foram avaliadas como uma função da espessura do leito, da posição ao longo do secador, e do tempo de secagem. O sistema de equações diferenciais resultante do equacionamento matemático foi resolvido em plataforma Matlab aplicando o método das linhas. A validação do modelo foi inicialmente baseada na comparação de resultados simulados com dados experimentais obtidos na literatura para secagem em batelada de milho e arroz em leito de camada espessa. Para ambos os casos investigados são apresentados os perfis de umidade e temperatura do sólido, e temperatura do ar de secagem em um secador cujo leito tem espessura total de 0,5 m. Os resultados corroboraram a consistência do modelo e validaram a estratégia de simulação numérica do sistema de equações diferenciais para situações onde as propriedades investigadas dependem do tempo de secagem e da espessura do leito. Com o intuito de avaliar também a influência da posição, comparações de resultados simulados com os obtidos em experimentos de secagem de erva-mate em um secador de esteira com leitos de camada espessa, operando tanto em regime permanente quanto em regime transiente, foram realizadas. Como resultados dos experimentos em regime permanente, foram obtidas a umidade e a temperatura do sólido e a temperatura do ar de secagem em leitos de espessura 0,05, 0,10 e 0,15 m. O efeito da temperatura do ar sobre a umidade do sólido foi também observado repetindo-se os experimentos em três diferentes perfis de temperatura do ar no interior da câmara de secagem. Baseado na comparação entre os dados experimentais e os resultados provenientes da simulação, pode-se afirmar que o modelo proposto fornece uma real representação da secagem de erva-mate em secador contínuo de camada espessa.

## **ABSTRACT**

A two phase's model to represent the drying of mate in a continuous deep-bed dryer was suggested. The model was mainly obtained by mass balance of the solute in the fluid and solid phase and energy in both phases. Temperature and humidity of the phases were evaluated as a function of bed thickness, position along the dryer and drying time. The system of differential equations resultant from the mathematical modeling was solved in Matlab platform by applying the method of lines. The model validation was initially based on comparison of simulated results with experimental data obtained in literature for drying batches of corn and rice in thick layer bed. For both investigated cases, the moisture profiles, the solid temperature and the drying air temperature in a dryer whose bed has a total thickness of 0.5 m are presented. The results confirm the consistency of the model and validate the strategy of numerical simulation of the differential equations system for situations where the investigated properties depend on the drying period and the bed thickness. In order to evaluate the influence of position, comparisons between simulated results and those obtained in experiments of yerba mate drying on a conveyor dryer with thick beds, operating both in steady state and in transient, were performed. As results of the experiments in steady state, the humidity and temperature of the solid and drying air temperature in thick beds of 0.05, 0.10 and 0.15 m were obtained. The effect of air temperature on the moisture of the solid was also observed by repeating experiments on three different temperature profiles of air inside the drying chamber. Based on the comparison between experimental data and results from the simulation, it can be stated that the proposed model provides a realistic representation of the drying of mate in a continuous deep-bed dryer.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Folhas de erva-mate. ....	19
Figura 2. Produção da erva-mate no Paraná (mil toneladas) (SEAB/DERAL, 2013).....	20
Figura 3. Fluxograma de manufatura da erva-mate para obtenção de matéria desidratada. ....	21
Figura 4. Esquema do aparato experimental. 1: motor elétrico, sistema de redução e manipulação de velocidade da esteira; 2: forno tubular para aquecimento do ar; 3: compressor para insuflar ar na câmara de secagem; 4: câmara de secagem; 5: leito de folhas de erva-mate; 6-9: termopares do tipo K. ....	30
Figura 5. Representação das coordenadas z (espessura do leito) e x (posição no leito de secagem) nas quais as propriedades do sólido e do ar de secagem variam, sendo o retângulo maior o leito de secagem e o retângulo menor o elemento infinitesimal. ....	34
Figura 6. Comparação entre resultados experimentais (símbolos) e simulados (curvas) para a umidade do milho. Linha tracejada e triângulos referem-se a 60 minutos de secagem. Linha contínua e quadrados indicam resultados obtidos em 15 minutos. ....	45
Figura 7. Comparação entre resultados experimentais (símbolos) e simulados (curvas) para a temperatura do ar na secagem de milho. Linha tracejada e triângulos referem-se a 60 minutos de secagem. Linha contínua e quadrados indicam resultados obtidos em 15 minutos.....	46
Figura 8. Comparação entre a umidade estimada (curva) e experimental (símbolos) do ar na saída do leito da secagem de milho. ....	47
Figura 9. Comparação entre resultados experimentais (símbolos) e simulados (curvas) para a umidade do arroz com casca. Resultados calculados (linha sólida) e experimentais (quadrado sólido) – na espessura de 8 a 9 cm; Resultados calculados (linha tracejada) e experimentais (quadrado vazado) – na espessura de 17 a 18 cm.....	48

Figura 10. Comparação entre resultados experimentais (símbolos) e simulados (curvas) para a umidade do ar de secagem do arroz com casca. Resultados calculados (linha sólida) e experimentais (quadrado sólido) – na espessura de 8 a 9 cm; Resultados calculados (linha tracejada maior) e experimentais (quadrado vazado) – na espessura de 17 a 18 cm; Resultados calculados (linha tracejada menor) e experimentais (losango) – na espessura de 24 a 25 cm. 49

Figura 11. Comparação entre resultados experimentais (símbolos) e simulados (curvas) para a temperatura do ar de secagem do arroz com casca. Resultados calculados (linha sólida) e experimentais (quadrado sólido) – na espessura de 8 a 9 cm; Resultados calculados (linha tracejada maior) e experimentais (quadrado vazado) – na espessura de 17 a 18 cm; Resultados calculados (linha tracejada menor) e experimentais (losango) – na espessura de 24 a 25 cm. 50

Figura 12. Comparação entre resultados experimentais (símbolos) e simulados (curvas) para a umidade do sólido na secagem da erva-mate em um leito de 0,05 m do Experimento 1.....51

Figura 13. Comparação entre resultados experimentais (símbolos) e simulados (curvas) para a umidade do sólido na secagem da erva-mate em um leito de 0,10 m do Experimento 1.....52

Figura 14. Comparação entre resultados experimentais (símbolos) e simulados (curvas) para a umidade do sólido na secagem da erva-mate em um leito de 0,15 m do Experimento 1.....52

Figura 15. Comparação entre resultados experimentais (símbolos) e simulados (curvas) para a umidade do sólido na secagem da erva-mate em um leito de 0,05 m do Experimento 2.....53

Figura 16. Comparação entre resultados experimentais (símbolos) e simulados (curvas) para a umidade do sólido na secagem da erva-mate em um leito de 0,10 m do Experimento 2.....53

Figura 17. Comparação entre resultados experimentais (símbolos) e simulados (curvas) para a umidade do sólido na secagem da erva-mate em um leito de 0,15 m do Experimento 2.....54

Figura 18. Comparação entre resultados experimentais (símbolos) e simulados (curvas) para a umidade do sólido na secagem da erva-mate em um leito de 0,05 m do Experimento 3.....54

Figura 19. Comparação entre resultados experimentais (símbolos) e simulados (curvas) para a umidade do sólido na secagem da erva-mate em um leito de 0,10 m do Experimento 3.....55

Figura 20. Comparação entre resultados experimentais (símbolos) e simulados (curvas) para a umidade do sólido na secagem da erva-mate em um leito de 0,15 m do Experimento 3.....55

Figura 21. Comparação entre resultados experimentais (símbolos) e simulados (curvas) para a temperatura do sólido na secagem da erva-mate em um leito de 0,05 m do Experimento 1. ..57

Figura 22. Comparação entre resultados experimentais (símbolos) e simulados (curvas) para a temperatura do sólido na secagem da erva-mate em um leito de 0,10 m do Experimento 1. ..57

Figura 23. Comparação entre resultados experimentais (símbolos) e simulados (curvas) para a temperatura do sólido na secagem da erva-mate em um leito de 0,15 m do Experimento 1. ..58

Figura 24. Comparação entre resultados experimentais (símbolos) e simulados (curvas) para a temperatura do sólido na secagem da erva-mate em um leito de 0,05 m do Experimento 2. ..58

Figura 25. Comparação entre resultados experimentais (símbolos) e simulados (curvas) para a temperatura do sólido na secagem da erva-mate em um leito de 0,10 m do Experimento 2. ..59

Figura 26. Comparação entre resultados experimentais (símbolos) e simulados (curvas) para a temperatura do sólido na secagem da erva-mate em um leito de 0,15 m do Experimento 2. ..59

Figura 27. Comparação entre resultados experimentais (símbolos) e simulados (curvas) para a temperatura do sólido na secagem da erva-mate em um leito de 0,05 m do Experimento 3. ..60

Figura 28. Comparação entre resultados experimentais (símbolos) e simulados (curvas) para a temperatura do sólido na secagem da erva-mate em um leito de 0,10 m do Experimento 3. ..60

Figura 29. Comparação entre resultados experimentais (símbolos) e simulados (curvas) para a temperatura do sólido na secagem da erva-mate em um leito de 0,15 m do Experimento 3. ..61

Figura 30. Comparação entre resultados experimentais (símbolos) e simulados (curvas) para a temperatura do gás na secagem da erva-mate em um leito de 0,05 m do Experimento 1.....	62
Figura 31. Comparação entre resultados experimentais (símbolos) e simulados (curvas) para a temperatura do gás na secagem da erva-mate em um leito de 0,10 m do Experimento 1.....	62
Figura 32. Comparação entre resultados experimentais (símbolos) e simulados (curvas) para a temperatura do gás na secagem da erva-mate em um leito de 0,15 m do Experimento 1.....	63
Figura 33. Comparação entre resultados experimentais (símbolos) e simulados (curvas) para a temperatura do gás na secagem da erva-mate em um leito de 0,05 m do Experimento 2.....	63
Figura 34. Comparação entre resultados experimentais (símbolos) e simulados (curvas) para a temperatura do gás na secagem da erva-mate em um leito de 0,10 m do Experimento 2.....	64
Figura 35. Comparação entre resultados experimentais (símbolos) e simulados (curvas) para a temperatura do gás na secagem da erva-mate em um leito de 0,15 m do Experimento 2.....	64
Figura 36. Comparação entre resultados experimentais (símbolos) e simulados (curvas) para a temperatura do gás na secagem da erva-mate em um leito de 0,05 m do Experimento 3.....	65
Figura 37. Comparação entre resultados experimentais (símbolos) e simulados (curvas) para a temperatura do gás na secagem da erva-mate em um leito de 0,10 m do Experimento 3.....	65
Figura 38. Comparação entre resultados experimentais (símbolos) e simulados (curvas) para a temperatura do gás na secagem da erva-mate em um leito de 0,15 m do Experimento 3.....	66
Figura 39. Comparação entre os resultados simulados e experimentais para a umidade do sólido (a), temperatura do sólido (b) e temperatura do gás (c). Símbolos – pontos de encontro entre os resultados simulados e os dados experimentais; Linha contínua – função identidade. .....	67

Figura 40. Variação da umidade da erva-mate no leito de 0,15 m. Linha contínua – Experimento 1 ( $T_{\text{média do gás}}=39^{\circ}\text{C}$ ); Linha tracejada grande – Experimento 2 ( $T_{\text{média do gás}}=47^{\circ}\text{C}$ ); Linha tracejada pequena – Experimento 3 ( $T_{\text{média do gás}}=53^{\circ}\text{C}$ ). .....68

Figura 41. Variação da umidade da erva-mate submetida às condições do Experimento 2. Linha contínua – Leito de espessura 0,05 m; Linha tracejada grande – Leito de 0,10 m; Linha tracejada curta – Leito de 0,15 m. ....69

Figura 42. Variação da velocidade da correia ao longo do tempo de secagem. Os símbolos representam o exato momento em que ocorreu a troca do leito ou a pesagem do mesmo. ....70

Figura 43. Comparação entre a umidade do sólido estimada (curva) e experimental (símbolos) no Experimento 1 da secagem em regime transiente. ....71

Figura 44. Comparação entre a umidade do sólido estimada (curva) e experimental (símbolos) no Experimento 2 da secagem em regime transiente. ....71

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Modelos empíricos de secagem. ....	27
Tabela 2. Características do sólido nos experimentos de secagem de milho realizados por Calçada et al. (1993) e, de arroz, por Zare & Chen (2009). ....	27
Tabela 3. Condições de operação nos experimentos de secagem de milho realizados por Calçada et al. (1993) e, de arroz, por Zare & Chen (2009). ....	28
Tabela 4. Características do ambiente, da esteira e do ar de secagem em cada experimento realizado para simular a secagem de erva-mate em regime estacionário. ....	31
Tabela 5. Características do sólido no início de cada secagem da erva-mate em regime estacionário. ....	32
Tabela 6. Características do sólido, do ambiente e do ar de secagem em cada experimento realizado para simular a secagem de erva-mate em regime transiente. ....	33
Tabela 7. Coeficientes da Equação (44) para cálculo do calor específico do ar e vapor d'água. ....	42

## LISTA DE SÍMBOLOS

$a$	Razão entre a área superficial total de transferência de calor e massa e o volume do leito, $\text{m}^2 \text{m}^{-3}$
$a_p$	Área superficial das partículas, $\text{m}^2$
$a_s$	Área superficial específica do sólido, $\text{m}^2 \text{m}^{-3}$
$A_{ss}$	Área efetiva da seção da amostra, $\text{m}^2$
$A_{\text{Total}}$	Área total, $\text{m}^2$
$C_{pg}$	Calor específico do ar, $\text{J Kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
$C_{pl}$	Calor específico da água líquida, $\text{J Kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
$C_{ps}$	Calor específico do sólido seco, $\text{J Kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
$C_{pv}$	Calor específico do vapor d'água, $\text{J Kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
$C_s$	Coefficiente efetivo de transferência de massa, $\text{s}^{-1}$
$d_s$	Diâmetro equivalente da partícula ou o diâmetro da esfera que representa a partícula, $\text{m}$
$G_g$	Velocidade mássica, $\text{Kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$
$h$	Coefficiente de transferência de calor, $\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
$h_a$	Coefficiente volumétrico efetivo de transferência de calor, $\text{J m}^{-3} \text{s}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
$h_m$	Coefficiente modificado de transferência de calor, $\text{W Kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
$k_s$	Condutividade térmica do sólido, $\text{W m}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
$K$	Coefficiente de transferência de massa, $\text{Kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$
$K_a$	Coefficiente volumétrico efetivo de transferência de massa, $\text{Kg m}^{-3} \text{s}^{-1}$
$m_{ss}$	Vazão mássica de sólido seco, $\text{Kg s}^{-1}$
$MR$	Umidade, adimensional
$P$	Pressão atmosférica, Pascal
$P_{\text{sat}}$	Pressão de saturação da água, Pascal
$Q_s$	Vazão volumétrica de sólido, $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$
$RH$	Umidade relativa, decimal
$t$	Tempo, $\text{s}$
$T_g$	Temperatura do ar de secagem, $^\circ\text{C}$
$T_r$	Temperatura de referência, $^\circ\text{C}$
$T_s$	Temperatura do sólido, $^\circ\text{C}$
$u_c$	Velocidade da correia do secador, $\text{m s}^{-1}$

$V_{\text{leito}}$	Volume total de matéria-prima, $\text{m}^3$
$V_s$	Volume de sólidos, $\text{m}^3$
$V_{ss}$	Volume de sólidos secos, $\text{m}^3$
$Y$	Umidade bulk da erva mate em base seca, $\text{Kg Kg}^{-1}$
$Y_m$	Umidade média da erva-mate, adimensional
$Y_g$	Umidade do ar de secagem, $\text{Kg Kg}^{-1}$
$Y_s$	Umidade do sólido em base seca, $\text{Kg Kg}^{-1}$
$Y_{sm}$	Umidade média da erva-mate, $\text{Kg Kg}^{-1}$
$Y_{sim}$	Umidade média inicial da erva-mate em base seca, $\text{Kg Kg}^{-1}$
$Y_{se}$	Umidade de equilíbrio sólido em base seca, $\text{Kg Kg}^{-1}$
$Y_i$	Umidade inicial do sólido em base seca, $\text{Kg Kg}^{-1}$
$Y_{bu}$	Umidade do sólido em base úmida, $\text{Kg Kg}^{-1}$
$x$	Posição ao longo do percurso da esteira, m
$z$	Coordenada espacial na direção de escoamento do gás, m
$\varepsilon$	Porosidade do leito, adimensional
$\lambda$	Calor latente de vaporização da água, $\text{J/Kg}$
$\mu_g$	Viscosidade do ar de secagem, $\text{Kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$
$\rho_{\text{bulk}}$	Densidade bulk do sólido, $\text{Kg m}^{-3}$
$\rho_s$	Densidade aparente do sólido, $\text{Kg m}^{-3}$
$\rho_{ss}$	Densidade do sólido seco, $\text{Kg m}^{-3}$



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO .....</b>	<b>18</b>
2.1	ERVA-MATE.....	18
2.1.1	Importância socioeconômica .....	19
2.1.2	Composição físico-química .....	20
2.1.3	Processamento .....	21
2.1.4	Produtos .....	22
2.2	MODELOS DE SECADORES .....	23
2.2.1	Secadores rotativos .....	23
2.2.2	Secadores de esteira.....	23
2.3	PROPRIEDADES DE TRANSPORTE .....	24
2.4	PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS .....	25
2.4.1	Umidade de equilíbrio da erva-mate .....	25
2.4.2	Calor específico, condutividade térmica e densidade da erva-mate.....	25
2.5	MODELOS EMPÍRICOS E FENOMENOLÓGICOS DE SECAGEM .....	26
2.6	DADOS DA LITERATURA PARA VALIDAÇÃO DO MODELO .....	27
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>29</b>
3.1	EXPERIMENTOS .....	29
3.2	MODELO MATEMÁTICO .....	33
3.2.1	Balanço de massa para a água contida nas folhas .....	34
3.2.2	Balanço de energia na fase sólida do secador.....	38
3.2.3	Equações do balanço de massa e energia na fase fluída.....	40
3.2.4	Propriedades físico-químicas e de transferência de calor e massa .....	40
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>45</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>72</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>73</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O comércio mundial da erva-mate (*Ilex paraguariensis* Saint Hilaire) movimenta cifras anuais da ordem de um bilhão de dólares, e envolve mais de 70 países (HALLOY & REID, 2003). A planta é nativa da América do Sul (BALZAN et al., 2013), sendo produzida e consumida na Argentina, Brasil, Chile, Paraguai e Uruguai (BURRIS et al., 2013).

O consumo da erva-mate não é realizado em sua forma in natura, e necessita passar por um processamento (HECK & MEJIA, 2007). As folhas de *Ilex paraguariensis* são secas e picadas para posteriormente serem utilizadas em infusões para o consumo na forma de chá. A bebida é utilizada como fonte de cafeína, em substituição ou em paralelo com chá e café, e também como um agente terapêutico devido à alegação de propriedades farmacológicas (BRACESCO et al., 2011).

Quando na utilização de infusões, é necessário que a matriz vegetal passe por um processo de secagem, para facilitar a extração de compostos solúveis (HOFMANN et al., 2012). Além disso, a secagem também é o método mais antigo de conservação de alimentos contra a deterioração microbiológica. Ainda, de forma indireta, a diminuição da massa e do volume das folhas minimiza posteriores gastos com embalagem, transporte e armazenamento (HELDMAN & LUND, 2007; MUJUNDAR, 2006). Todos esses fatores justificam a importância dos estudos envolvidos nessa operação.

A ferramenta utilizada neste trabalho para o estudo da secagem é a modelagem e simulação computacional. A simulação é o meio mais rápido de levar as pessoas a uma compreensão mais ampla de um problema ou sistema. Ela se torna indispensável em ambientes onde a quantidade de variáveis impossibilita prever todas as melhores opções sem o auxílio de ferramenta computacional (PINHEIRO et al., 2005). Portanto, utilizando-se da modelagem computacional em processos de secagem, por exemplo, tem-se uma ferramenta rápida e barata para prever a variação de importantes parâmetros operacionais, incluindo a temperatura e a umidade do ar, a temperatura do sólido e, especialmente a umidade do sólido durante o processo de secagem (HARCHEGANI et al., 2012).

Modelos de secagem para descrição da variação exclusivamente da umidade do sólido em secadores batelada são relativamente simples (frequentemente são semi-empíricos) e abundantes na literatura (ex.; ZANOELO et al., 2007). Entretanto, a predição de um conjunto mais amplo de variáveis importantes em secadores, como a temperatura do sólido e as propriedades do ar de secagem, demanda modelos fenomenológicos, como os que serão

considerados nesta investigação. Atualmente é possível encontrar um modelo que representa a secagem da erva-mate em secador de esteira em leito raso operando em regime transiente (ABITANTE, 2007; ZANOELO et al., 2008). No entanto, quando se trata de secagem em leito de camada espessa em secador contínuo, o problema torna-se mais complexo, pois é necessário levar em consideração que as propriedades do sólido e do ar variam nas diferentes posições ao longo da altura do leito (GARCÍA-PERÉZ, 2009).

Neste sentido, o objetivo principal da dissertação é propor um modelo de duas fases, transiente e bi-dimensional, para simulação da secagem de erva mate em secador contínuo de camada espessa. O equacionamento essencialmente demandou uma alteração do modelo clássico de duas fases para secador batelada, ou do modelo para secador contínuo de camada fina, a fim de considerar a movimentação do leito na direção axial ou a variação das propriedades do sólido e gás de secagem com a altura, respectivamente. Uma etapa experimental de obtenção de perfis de umidade e temperatura em ambas as fases do secador foi realizada em secador contínuo de erva-mate com o propósito de validação do modelo sugerido. Comparações entre resultados calculados e experimentais confirmam a validade do modelo investigado, assim como da rotina de cálculo proposta.

Uma vez obtido um modelo transiente, é possível, por exemplo, utilizá-lo em estratégias de controle preditivo para prever o efeito de perturbações no processo contínuo. Convencionalmente, com modelos intrinsecamente permanentes para camada espessa em processo contínuo, isso não seria possível.

## 2 REVISÃO

O presente capítulo apresenta primeiramente e de forma resumida as características do objeto de estudo desse trabalho, a erva-mate. Tópicos como a importância socioeconômica, a composição físico-química, detalhes do processamento e produtos comercializados são apresentados. Além da descrição da matéria-prima, informações importantes para a modelagem da secagem da mesma são reportadas. Dentro desse contexto, é apresentada uma breve apresentação sobre os secadores utilizados nessa operação, e propriedades de transporte e termofísicas necessários para o modelo. Por fim, ainda são apresentados os modelos mais simples de secagem de erva-mate já existentes na literatura e os dados utilizados para a validação da estratégia de simulação numérica do sistema de equações resultantes.

### 2.1 ERVA-MATE

Erva mate é um dos nomes populares da planta *Ilex paraguariensis* St. Hill. O nome botânico foi definido pelo naturalista francês Saint-Hilaire, que utilizou como base exemplares da planta coletados em Curitiba, durante suas viagens pelo sul do Brasil em 1820. O nome foi escolhido pela similaridade da planta com a erva do Paraguai, sendo *Ilex* a representação do gênero botânico da mesma, que por sua vez, pertencente à família Aquifoleaceae (COSTA, 1989; MAZUCHOWSKI, 1991).

A erva-mate se caracteriza por ser um arbusto que pode atingir 15 metros de altura, mas geralmente, quando podada, não passa de 7 metros. O caule é um tronco de cor acinzentada, geralmente com 20 a 25 centímetros de diâmetro, podendo chegar aos 50 centímetros. As folhas apresentam-se estreitas na base e ligeiramente obtusas no vértice, com bordas providas de pequenos dentes, visíveis principalmente da metade do limbo para a extremidade (MAZUCHOWSKI, 1991), conforme apresentado na Figura 1.

Em particular, a erva-mate é uma planta nativa da região subtropical da América do Sul, estando presente no sul do Brasil, norte da Argentina, Paraguai e Uruguai (BASTOS et al., 2007). No Brasil, ela se distribui nos Estados do Mato Grosso do Sul, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul (REISSMANN et al., 1999).

A erva-mate não é apenas largamente consumida na América do Sul, como também tem ganhado uma rápida introdução no mercado mundial (HECK & MEJIA, 2007). O crescente

consumo da mesma ocorre principalmente pelos seus benefícios à saúde (SOUZA et al., 2011). Além de sua alta capacidade antioxidante, ela também é utilizada devido à alegação de suas propriedades estimulante, diurética e anti-inflamatória (HECK & MEJIA, 2007; KRAEMER et al., 1996).



Figura 1. Folhas de erva-mate.

#### 2.1.1 Importância socioeconômica

O Brasil é o segundo maior produtor de erva-mate, sendo superado apenas pela Argentina. Sendo assim, a exploração da erva-mate é uma importante atividade agrícola para o País, principalmente em se tratando da região Sul, a qual responde por aproximadamente 97% da produção nacional (EMBRAPA, 2010).

Dos 20 maiores municípios brasileiros produtores de erva-mate, 15 são Paranaenses (IBGE, 2013). A produção histórica anual do Estado desde 2000 até 2012 são reportadas na Figura 2.

Interessante destacar que no Paraná e em Santa Catarina, a maior parte da erva-mate tem sua origem em ervais nativos, diferentemente do que ocorre no Rio Grande do Sul. Esse fato resulta numa grande procura dos industriais sul-rio-grandenses pela erva produzida naqueles estados (EMBRAPA, 2010).

Outro fator importante da atividade do extrativismo ervateiro é que ele é um dos responsáveis pela manutenção de grande parte dos fragmentos florestais ainda existentes na Floresta de Araucária. A exploração da erva-mate nativa poderia até ser a atividade extrativa mais sustentável do Brasil, se não houvesse excesso nos sistemas de poda dos ervais nativos. Além disso, também vale ressaltar que os sistemas de produção do cultivo de erva-mate são do ponto de vista ambiental, um dos que menos utiliza produtos químicos (EMBRAPA, 2010).

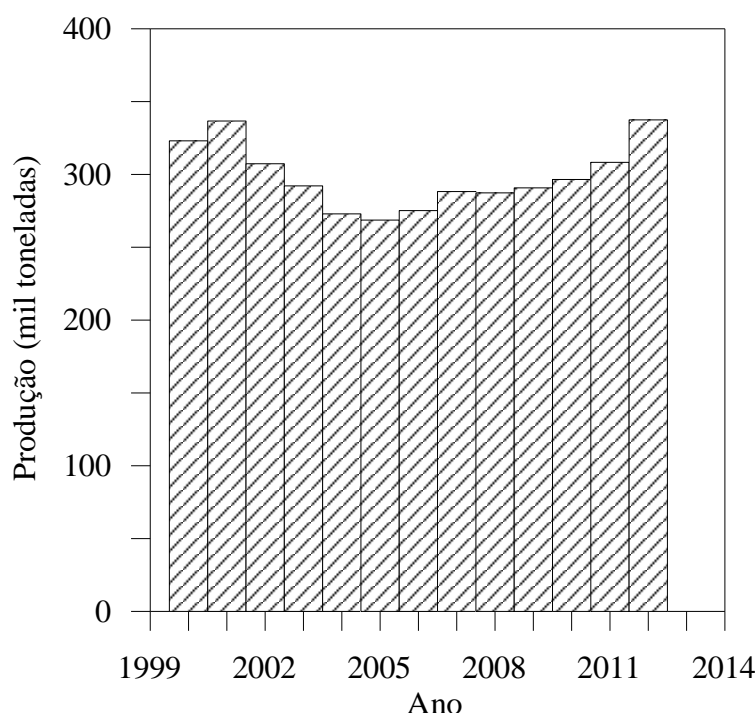


Figura 2. Produção da erva-mate no Paraná (mil toneladas) (SEAB/DERAL, 2013)

### 2.1.2 Composição físico-química

Estudos indicam que a erva-mate é constituída por água, celulose, gomas, dextrina, mucilagem, glicose, pentose, substâncias graxas, resinas aromáticas, legumina, albumina, cafeína, cafearina, cafamarina, ácido matetânico, ácido fólico, ácido caféico, ácido virídico, clorofila, colestereína e óleos essenciais (CROCE, 2002).

Efing et al. (2009) realizaram análises de composição centesimal (+nitrogênio) e de capacidade antioxidante para folhas originárias da região de Irati (PR). Em particular, em folhas secas e inteiras, foram encontrados valores de umidade, resíduo mineral fixo, lipídios e nitrogênio iguais a 11,23%; 5,51%; 10,91% e 2,08%, respectivamente. Análises dos mesmos

parâmetros foram feitas com folhas desidratadas trituradas, o que revelou valores análogos de umidade (10,59%), resíduo mineral fixo (5,60%), lipídeos (10,84%) e nitrogênio (1,72%). No mesmo estudo, extratos obtidos a partir de folhas íntegras e desidratadas revelaram atividade antioxidante diferentes. Este fato provavelmente decorre das maiores taxas de transferência de soluto por difusão encontradas em partículas de tamanhos diferentes. De qualquer forma, a fragmentação é uma etapa do processamento da erva-mate que será detalhado na sequência.

### 2.1.3 Processamento

O beneficiamento da erva-mate consiste basicamente nas seguintes etapas: desativação enzimática, secagem e fragmentação (ESMELINDRO et al., 2002). Maiores detalhes da manufatura são demonstrados na Figura 3.

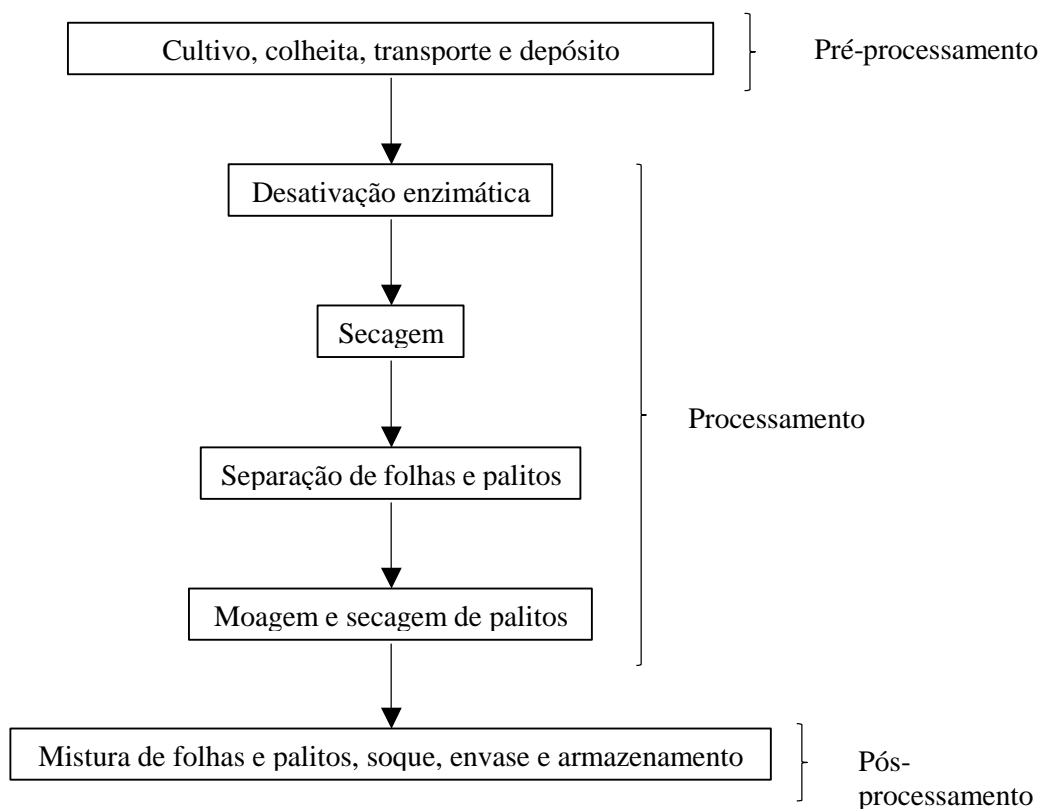


Figura 3. Fluxograma de manufatura da erva-mate para obtenção de matéria desidratada.

A primeira etapa consiste na passagem rápida das folhas pelas chamas junto ao fogo direto. Neste momento, a erva colhida passa por um cilindro metálico, perfurado e inclinado. O tempo de residência varia em torno de 8 minutos e, a temperatura média da erva é de 400°C

na entrada e 65°C na saída. Por isso, nessa etapa, além da inativação de enzimas (peroxidase e polifenoloxidase) que causam oxidação do produto, também ocorre a retirada da umidade superficial (ESMELINDRO et al., 2002). Essa pré-secagem reduz a umidade de  $60 \pm 5\%$  para em torno de  $20 \pm 15\%$  em base úmida (ZANOELO et al., 2003).

Após essa etapa de inativação enzimática, as folhas são alimentadas em um secador em que a umidade cai para valores inferiores à 10% (base úmida) (ABITANTE, 2007). A importância dessa etapa consiste no fato de ela permitir a obtenção da qualidade desejada do produto, e também a conservação do mesmo contra a deterioração microbiológica. Como a presença de água é essencial para as reações enzimáticas, a remoção da mesma impede essas reações e as atividades dos microrganismos contaminantes presentes. Isso ocorre porque a remoção da água aumenta a concentração do soluto do sistema alimentar e, portanto, reduz a disponibilidade de água para os microorganismos crescerem (MUJUNDAR, 2006). Sendo assim, a secagem permite maiores períodos de armazenamento (HELDMAN & LUND, 2007). Além disso, ela permite que os requisitos de embalagem sejam minimizados e os pesos de envio reduzidos, o que conseqüentemente requer menores custos de transporte (HELDMAN & LUND, 2007; MUJUNDAR, 2006).

Terminada a secagem, o processamento da erva-mate é finalizado com a fragmentação das folhas em um processo de trituração (ESMELINDRO et al., 2002).

#### 2.1.4 Produtos

As folhas de erva-mate são empregadas no preparo de bebidas obtidas por infusão. O solvente envolvido nesta extração pode ser água a temperatura ambiente ou aquecida. Eventualmente estas bebidas são produzidas a partir de folhas submetidas a uma operação de tostagem (BASTOS et al., 2005).

Além do preparo de bebidas, a erva-mate também é matéria-prima utilizada por várias farmacopeias na preparação farmacêutica. Em virtude de suas virtudes terapêuticas, a *Ilex paraguariensis* St.-Hil. é recomendada como estimulante, anti-inflamatório, e diurético (BERTÉ et. al, 2011; PUANGPRAPHANT et. al., 2013, VALDUGA, 1997). Na medicina popular, a infusão de erva-mate também tem sido utilizada para o tratamento de uma série de doenças, incluindo hepáticas e desordens digestivas, artrite, reumatismo, obesidade, hipertensão, e hipercolesterolemia (MORAIS et. al, 2009).



Além dessas aplicações, a erva-mate também é utilizada na fabricação de corantes e detergentes, especialmente para uso em hospitais (VALDUGA, 1997).

## 2.2 MODELOS DE SECADORES

Conforme já mencionado anteriormente, a etapa de secagem pode ser realizada em secadores mecânicos rotativos ou de esteira. O que difere um secador do outro está relacionado principalmente com o fato de que, no secador rotativo, os gases de secagem (gases de combustão ou ar quente) entram em contato direto com a matéria-prima, enquanto que no de esteira, o contato é indireto, causando menores danos ao produto. Em relação às características operacionais, no secador de esteira, o tempo de residência médio é de 3 horas e a temperatura média da erva varia entre 90 e 110°C. No secador rotativo o tempo de contato direto do produto com a fumaça é em torno de 30 minutos. Já a temperatura média é de 350°C na entrada e 110°C na saída, não apresentando a mesma uniformidade da utilizada no secador de esteira (ESMELINDRO et al., 2002).

### 2.2.1 Secadores rotativos

A secagem neste caso se dá em uma carcaça cilíndrica rotativa, suportada por rolamentos, e normalmente ligeiramente inclinada na horizontal. O produto úmido é alimentado em uma das extremidades do secador dirigindo-se em movimento rotatório para a extremidade oposta. O sentido do fluxo de gás através do cilindro relativamente ao sólido é ditado, principalmente, pelas propriedades do material processado. Fluxo cocorrente é recomendado para materiais sensíveis ao calor, pois mesmo que a temperatura do gás seja alta na entrada, ele rapidamente se resfria com a troca de calor para a evaporação da umidade superficial. Já para outros materiais o fluxo contracorrente é desejável devido a sua alta eficiência térmica (MUJUMDAR, 2006).

### 2.2.2 Secadores de esteira

No secador de esteira o produto é carregado por esteiras através de uma câmara de secagem, onde o ar quente é bombeado em direção perpendicular ao escoamento do sólido,

contracorrente ou cocorrente. Caracteriza-se por ser um dos mais versáteis secadores disponíveis pois é de baixo custo, pode ser compacto e pode ser empregado para secagem de produtos variados, em termos de composição, forma e tamanho (MUJUMDAR, 2006). Além disso, o consumo de vapor como fonte de aquecimento do ar de secagem neste tipo de secador é baixo, sendo que normalmente são gastos apenas dois quilogramas de vapor por quilograma de água evaporada (MCCABE et al., 2005).

### 2.3 PROPRIEDADES DE TRANSPORTE

Apesar de o secador de esteira ser conceitualmente muito simples, um inapropriado entendimento do processo de transferência de massa e calor no mesmo, certamente levará a uma má manipulação do produto, desperdício de energia e qualidade não uniforme do produto (MUJUMDAR, 2006).

O coeficiente efetivo de transferência de massa da erva-mate foi determinado por Zanoelo et al. (2008). Em seu estudo foram comparados diversos modelos que representassem a resistência efetiva de transferência de massa das folhas de mate para o meio de secagem. Baseado nos maiores valores de  $R^2$ , e nos valores mais baixos de erro médio ao quadrado (MRE), a expressão empírica proposta por Panchariya et al. (2002), representada pela Equação (1), foi eleita para reproduzir os resultados experimentais de umidade das folhas de mate no decorrer do tempo. A utilização deste mesmo modelo pode também ser visualizado no trabalho de Jensen et al. (2011). Como, porém, este modelo é válido nas faixas de temperaturas do ar no intervalo de 80 a 120°C e velocidade do ar de 0,25 a 0,65 m s<sup>-1</sup> e no desenvolvimento desse trabalho foram utilizadas velocidades inferiores a estas ( $\approx 0.075$  a 0.095 m s<sup>-1</sup>) (TUSSOLINI et al., 2014), fez-se necessária a adição de um segundo termo à Equação (1), apresentado na Equação (2) (TUSSOLINI et al., 2014).

$$K = 10^{-6} (T_g)^{2,08} \left( \frac{G_g}{\rho_g} \right)^{1,11} \quad (1)$$

$$K = 10^{-6} (T_g)^{2,08} \left( \frac{G_g}{\rho_g} \right)^{1,11} + (2,05 \times 10^{-5} T_g - 1,73 \times 10^{-3}) \exp \left[ (0,46 T_g - 61,15) \frac{G_g}{\rho_g} \right] \quad (2)$$

Com relação ao coeficiente efetivo de transferência de calor ( $h_m$ ) da erva-mate, este é dado simplesmente por uma constante de valor igual à  $181 \text{ W Kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$  (JENSEN et al., 2011).

## 2.4 PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS

Os modelos matemáticos para descrição da secagem, quando utilizados para simulação, demandam em geral de propriedades termofísicas. Neste sentido, algumas dessas propriedades importantes da erva-mate são reportadas na sequência.

### 2.4.1 Umidade de equilíbrio da erva-mate

A umidade de equilíbrio se refere ao valor de umidade de um sólido em equilíbrio com o ar ambiente à determinada condição de umidade relativa e temperatura (ABITANTE, 2007).

A equação de Halsey Modificada foi proposta por Zanoelo (2005) como sendo a que melhor representa a umidade de equilíbrio da erva-mate. O modelo foi capaz de explicar 96% das variações dos teores de umidade de equilíbrio frente a variação da umidade relativa no intervalo de 11 a 75% nas temperaturas entre 30 e  $50^\circ\text{C}$ . O modelo é apresentado pela Equação (3).

$$Y_{se} = 10^{-2} \left[ \frac{-\exp(5,7 \times 10^{-3} T_g + 3,02)}{\ln RH} \right]^{0,662} \quad (3)$$

### 2.4.2 Calor específico, condutividade térmica e densidade da erva-mate

A densidade da erva-mate e o calor específico das folhas e dos galhos da erva-mate podem ser encontrados na literatura e são representadas pelas Equações (4), (5) e (6), respectivamente (SCHMALKO et al., 1997; SCHMALKO et al., 2007). Vale ressaltar que SCHMALKO et al. (1997) utilizaram valores de umidade entre aproximadamente 0,05 a 1,05 e 0,04 a 0,56 (base seca) para validação das Equações (4) e (6), respectivamente.

$$\rho_s = 558 + 4,47 \times 10^{-2} (Y_s)^2 \quad (4)$$

$$Cp_{\text{folha}} = 1539 + 2720 \left( \frac{Y_s}{Y_s + 1} \right) \quad (5)$$

$$Cp_{\text{galho}} = 1790 + 2360 \left( \frac{Y_s}{Y_s + 1} \right) \quad (6)$$

Entretanto, este trabalho demanda em particular somente do calor específico e densidade das folhas de erva-mate seca. Estes dados do produto seco, assim como a variação destas propriedades em função da umidade foram também obtidos por Zanoelo et al. (2011). Por ser este um trabalho mais recente, optou-se por adotar nesta investigação os valores de  $Cp_{ss}$  e  $\rho_{ss}$  sugeridos por estes autores (ZANOELO et al., 2011), os quais são  $1780 \text{ J Kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$  e  $750 \text{ Kg m}^{-3}$ , respectivamente.

## 2.5 MODELOS EMPÍRICOS E FENOMENOLÓGICOS DE SECAGEM

Modelos empíricos de secagem comumente encontrados na literatura são apresentados na Tabela 1 (SACILIK & UNAL, 2005; SOYSAL et al, 2006). Todos estes modelos são baseados nas simplificações analíticas da segunda lei de Fick (ZANOELO et al., 2007).

Na literatura também são apresentados modelos de secagem baseados em balanços de massa e energia. A maioria deles descreve processos contínuos em leitos de camada fina (KIRANOUDIS et al., 1995; ZANOELO et al., 2008; JENSEN et al., 2011) ou processos em leitos de camada espessa, mas em regime estacionário (SHARP, 1982; CALÇADA et al., 1993; MANDAS & HABTE, 2002; SRIVASTAVA & JOHN, 2002; ZARE & CHEN, 2009; ZARE et al., 2012; MARTINELLO et al., 2013). Modelos dinâmicos para secadores contínuos de camada espessa, como o proposto nesta investigação, são por sua vez limitados (SCHMALKO et al., 2007; VAN DELFT, 2010) e, mesmo nestes poucos casos, a validação é geralmente negligenciada (SCHMALKO et al., 2007; VAN DELFT, 2010). A complexidade da secagem continua em leito de camada espessa está no fato de as propriedades do sólido e do ar variarem não somente nas diferentes posições da esteira mas também ao longo da altura do leito (GARCÍA-PERÉZ, 2009).

Tabela 1. Modelos empíricos de secagem.

Modelo	Equação	Referência
Two-term exponencial	$\frac{Y_s - Y_{se}}{Y_i - Y_{se}} = A_0 \exp(-k_0 t) + A_1 \exp(-k_1 t)$	Zanoelo et al. (2007)
Henderson e Pabis	$\frac{Y_s - Y_{se}}{Y_i - Y_{se}} = A_0 \exp(-k_0 t)$	Henderson e Pabis (1969)
Lewis	$\frac{Y_s - Y_{se}}{Y_i - Y_{se}} = \exp(-kt)$	Jayas et al. (1991)

Nota:  $A_0$ ,  $A_1$ ,  $k_0$  e  $k$  são parâmetros do modelo e,  $t$  o tempo de secagem.

## 2.6 DADOS DA LITERATURA PARA VALIDAÇÃO DO MODELO

Dados experimentais de secagem de milho (CALÇADA et al., 1993) e arroz (ZARE & CHEN, 2009) encontrados na literatura foram utilizados para validar o modelo de duas fases preliminarmente investigado. As características do leito sólido de ambos os experimentos é apresentado na Tabela 2, enquanto que as características do ar de secagem, na Tabela 3.

Tabela 2. Características do sólido nos experimentos de secagem de milho realizados por Calçada et al. (1993) e, de arroz, por Zare & Chen (2009).

Propriedades do sólido	Milho	Arroz
Temperatura inicial (°C)	24,5	25
Umidade inicial (Kg Kg <sup>-1</sup> )	0,25	0,2475
Capacidade calorífica (J Kg <sup>-1</sup> °C)	1680	1109*
Densidade (Kg m <sup>-3</sup> )	1190	1000,00
Diâmetro médio superficial equivalente (m)	0,0078	0,00914
Porosidade do leito (adimensional)	0,4	0,5
Espessura do leito (m)	0,5	0,25

\*Fonte: SINGH & HELDMAN, 1993.

Tabela 3. Condições de operação nos experimentos de secagem de milho realizados por Calçada et al. (1993) e, de arroz, por Zare & Chen (2009).

Propriedades do ar de secagem	Milho	Arroz
Temperatura na alimentação (°C)	65	50
Umidade na alimentação (Kg Kg <sup>-1</sup> )	0,014	0,01
Velocidade mássica (Kg m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )	0,659	0,16

Vale ressaltar que o valor da densidade do arroz com casca apresentada na Tabela 1 foi calculado a partir de dados do trabalho de Zare & Chen (2009). Sabe-se que, a densidade aparente de um sólido está diretamente relacionada à densidade bulk do mesmo, conforme a Equação (7). Segundo Zare & Chen (2009), a densidade bulk do arroz é de 560 Kg m<sup>-3</sup>. A umidade em base úmida, também foi calculada, conforme a correlação apresentada pela Equação (8), sabendo-se que a umidade do arroz com casca, em base seca, para o cálculo da densidade foi de 0,12 (Zare & Chen, 2009).

$$\rho_s = \frac{\rho_{\text{bulk}}}{(1 - \varepsilon)} (1 - Y_{\text{bu}}) \quad (7)$$

$$Y_{\text{bu}} = \frac{Y_s}{1 + Y_s} \quad (8)$$

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais e métodos consistem em duas etapas distintas. A primeira refere-se aos experimentos de secagem com a erva-mate. A segunda etapa consiste no desenvolvimento do modelo matemático utilizado para gerar os resultados teóricos através das simulações em plataforma Matlab. Ambas as etapas são apresentadas separadamente neste capítulo em dois subitens. Vale ressaltar que os dados experimentais da secagem de arroz e de milho utilizados para validação prévia do modelo foram obtidos da literatura (CALÇADA et al., 1993; ZARE & CHEN, 2009).

#### 3.1 EXPERIMENTOS

O secador de esteira de bancada utilizado consistia em uma câmara de secagem com largura interna de 0,05 m, comprimento de 1 m e altura igual a 0,5 m. As paredes da câmara foram construídas com chapas duplas de aço galvanizado preenchidas com painéis de lã de vidro de 0,04 m de espessura e com revestimento externo aluminizado. No interior da câmara foi inserida uma esteira de teflon perfurada, movimentada por um rolo de tração conectado a um sistema motriz. Os furos na esteira apresentavam diâmetro igual a 0,04 m e dispunham-se em arranjo retangular com menor e maior espaçamento entre furos aproximadamente igual a 0,01 e 0,035 m, respectivamente.

Os rolos guias e de tração, os quais encontravam-se em extremidades opostas e externas a câmara de secagem, foram construídos em polipropileno e revestidos com fita adesiva antiderrapante. Ambos os rolos apresentavam pequenas abas laterais a fim de evitar o escorregamento lateral da esteira. O sistema de movimentação do rolo de tração envolvia um redutor mecânico de velocidade de 80:1 (UMI30, STM, Lippo di Calderara di Reno, BO, Itália) conectado a um motor de 12 v e 50 W de potência nominal (WAPSA, São Paulo, SP, Brasil) acoplado a um potenciômetro com indicador de mínima e máxima corrente (0 a 100 %).

Um compressor de 750 W com deslocamento teórico de 170 litros por minuto (MSV 6/30, Schulz Compressores, Joinville, SC, Brasil) foi utilizado para insuflar ar a pressão atmosférica para dentro da câmara em duas diferentes posições na base do secador ( $x=0,25$  e  $x=0,75$  m). Com o intuito de promover uma distribuição uniforme do gás de secagem o

mesmo foi forçado a passar através de uma bandeja perfurada contendo partículas de cerâmica. Um forno tubular com controle manual de temperatura (Fabrik für Laboratoriums, Düsseldorf, Alemanha) foi utilizado para aquecimento do ar proveniente do compressor. A temperatura do ar dentro da câmara de secagem foi monitorada através de quatro termopares do tipo *K* previamente calibrados, os quais se encontravam a 0,05 m, 0,20 m, 0,70 m e 0,85 m da entrada do secador. Uma representação esquemática do aparato experimental utilizado nos ensaios de secagem e controle de umidade é observada na Figura 4.

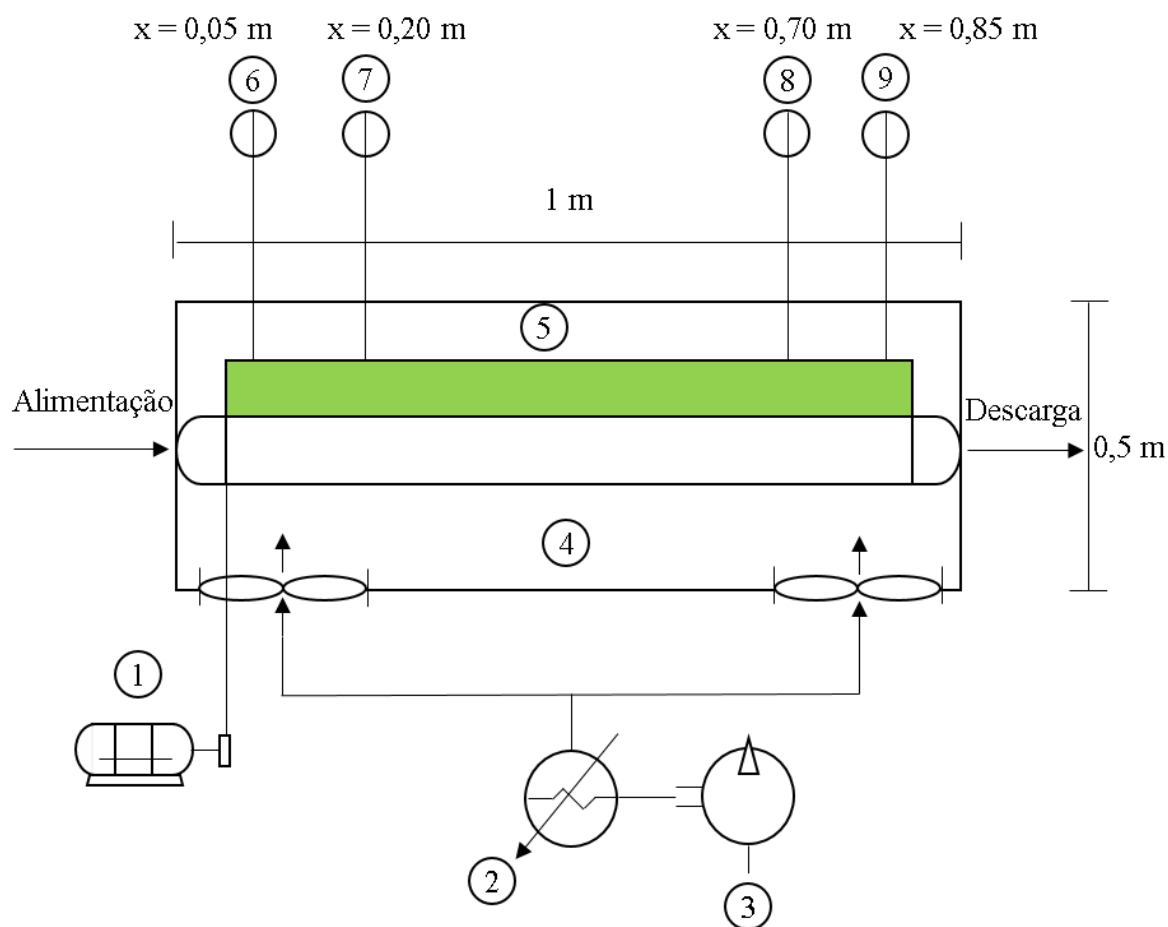


Figura 4. Esquema do aparato experimental. 1: motor elétrico, sistema de redução e manipulação de velocidade da esteira; 2: forno tubular para aquecimento do ar; 3: compressor para insuflar ar na câmara de secagem; 4: câmara de secagem; 5: leito de folhas de erva-mate; 6-9: termopares do tipo *K*.

Os experimentos foram realizados em duas etapas distintas: a primeira para obtenção de dados de umidade, temperatura do sólido e temperatura do ar de secagem em regime permanente; a segunda para medição dos mesmos parâmetros em regime transiente.



No caso do regime permanente, um leito de aproximadamente 0,15 m foi formado e alimentado na esteira de secagem. Em todos os testes em regime permanente a velocidade da esteira foi mantida em  $4,87 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$ . Foram realizadas seis corridas, sendo uma duplicata para medição da umidade do sólido, outra duplicata para medição da temperatura do sólido, e duas corridas em condições idênticas de operação para determinação da temperatura do ar de secagem. Estas seis corridas foram repetidas por mais duas vezes para que se obtivessem resultados em leitos de espessura iguais a 0,05 e 0,10 m. Todo esse procedimento foi ainda repetido em três diferentes condições de temperatura (Experimento 1, 2 e 3) conforme demonstrado na Tabela 4. Em resumo, um total de 54 ensaios de secagem foram realizados.

Além do perfil estabelecido de temperatura do ar na base da câmara, a Tabela 4 apresenta a temperatura média de alimentação do gás, a temperatura ambiente, a velocidade da esteira e a umidade do gás de alimentação.

Tabela 4. Características do ambiente, da esteira e do ar de secagem em cada experimento realizado para simular a secagem de erva-mate em regime estacionário.

	Experimento 1	Experimento 2	Experimento 3
T do gás (°C)	$32,2+76,6x-87,7x^2$	$33,5+129,5x-147,2x^2$	$27,8+194,1x-213,6x^2$
T média do gás (°C)	39	47	53
T ambiente (°C)	24	27	25
Velocidade da esteira ( $\text{m s}^{-1}$ )	$4,87 \times 10^{-4}$	$4,87 \times 10^{-4}$	$4,87 \times 10^{-4}$
Umidade do gás (Kg de água / Kg de ar)	0,01	0,01	0,01

Nota: Na primeira linha da tabela,  $x$  representa posição axial na esteira.

Para a medição da umidade do sólido realizou-se a pesagem das folhas do leito no em cada tempo de secagem, utilizando uma balança analítica de quatro dígitos (AS 220/C/2, Radwag Wagi Elektroniczne, Polônia). Na sequência essas mesmas folhas foram secas em estufa (SL 100, Solab Científica, Piracicaba, São Paulo, Brasil) até peso constante.

A temperatura do sólido no topo do leito foi medida com o auxílio de um sensor de infravermelho (ScanTemp 410, TFA Dostmann, Wertheim-Reicholzheim, Alemanha) nas posições 0, 0,05, 0,1, 0,15, 0,2, 0,7 e 0,8 m da esteira.

A Tabela 5 apresenta a temperatura e a umidade do sólido no início de cada experimento de secagem de erva-mate.

Por fim, a temperatura do gás foi medida com o auxílio de um termopar tipo K inserido no topo do leito, para medidas nas posições axiais (x) 0,10, 0,20, 0,70 e 0,80 m da esteira.

Tabela 5. Características do sólido no início de cada secagem da erva-mate em regime estacionário.

Experimento	Espessura do leito de secagem (cm)	Temperatura do sólido (°C)	Umidade do sólido (b.s.)
1	5	23,1	1,48
	10	26,5	1,32
	15	26,2	1,45
2	5	27,3	1,31
	10	26,7	1,29
	15	24,8	1,27
3	5	24,5	1,32
	10	23,1	1,32
	15	23,5	1,20

No caso da secagem em regime transiente foi utilizado um leito de folhas inteiras de erva-mate com espessura de 0,065 m. Na condição inicial, o leito encontrava-se disposto sobre toda a extensão da esteira, a qual permaneceu desligada por aproximadamente 3000 s. Um novo lote de folhas foi alimentado e a velocidade da esteira foi alterada para  $1,518 \times 10^{-3} \text{ m s}^{-1}$ , permanecendo neste valor até que o lote inicial fosse completamente removido da câmara de secagem (isto é, aproximadamente + 593 s). Após um tempo de operação de  $\approx 3593 \text{ s}$  a esteira teve sua velocidade novamente alterada para  $4,87 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$  e assim permaneceu um tempo adicional de  $\approx 1848 \text{ s}$  ( $0,9/4,87 \times 10^{-4}$ ). De forma análoga, a velocidade da esteira foi alterada aleatoriamente durante todo o período de realização do ensaio de secagem, e a umidade do produto na saída da câmara de secagem foi monitorada em intervalos irregulares de tempo. A Tabela 6 apresenta a temperatura ambiente, a umidade e a temperatura do gás, e a umidade inicial do sólido para os experimentos em regime transiente.

Vale ressaltar que os experimentos reportados somente se diferenciaram pela umidade inicial do sólido.

Tabela 6. Características do sólido, do ambiente e do ar de secagem em cada experimento realizado para simular a secagem de erva-mate em regime transiente.

	Experimento 1	Experimento 2
Temperatura ambiente (b.s.) (°C)	28	28
Umidade do gás (Kg de água/ Kg de ar)	0,01	0,01
Temperatura do gás (°C)	$40,2+268,1x-296,8x^2$	$40,2+268,1x-296,8x^2$
Temperatura média do gás (°C)	72,6	72,6
Umidade inicial do sólido (b.s.)	1,52	1,36

Nota: Na primeira terceira linha da tabela,  $x$  representa posição axial na esteira.

### 3.2 MODELO MATEMÁTICO

O modelo matemático proposto representa um sistema de duas fases para secagem em secador contínuo, no qual a fase sólida é considerada uma mistura de água líquida e matéria seca por meio do qual o ar escoar. Os balanços de massa e de energia do soluto na fase sólida são detalhados nos subitens abaixo. Com relação ao balanço de massa e energia na fase fluída, serão apresentadas apenas as equações resultantes dos mesmos, já que estas podem ser facilmente reproduzidas e também estarem disponíveis na literatura (ex.; CALÇADA et al., 1993). Vale ressaltar que, pelo fato de se tratar de um modelo bidimensional, as propriedades do sólido e do ar de secagem variam nas diferentes posições ( $x$ ) e espessuras ( $z$ ) do leito de secagem conforme o esquema representativo da Figura 5.

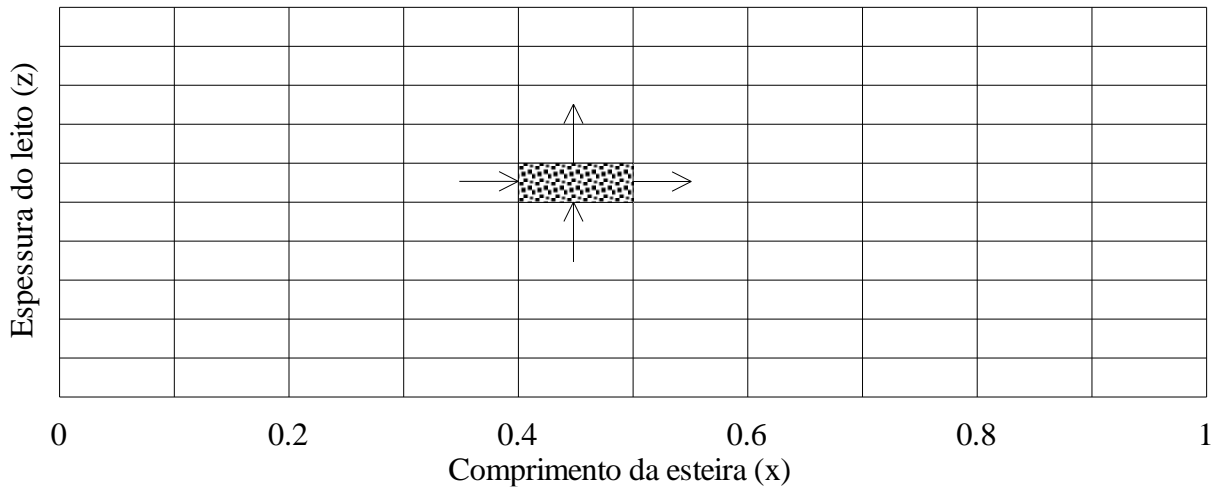


Figura 5. Representação das coordenadas  $z$  (espessura do leito) e  $x$  (posição no leito de secagem) nas quais as propriedades do sólido e do ar de secagem variam, sendo o retângulo maior o leito de secagem e o retângulo menor o elemento infinitesimal.

### 3.2.1 Balanço de massa para a água contida nas folhas

Sabe-se que:

$$\text{Entrada} - \text{Saída} = \text{Acúmulo} \quad (9)$$

Com a aplicação do balanço de massa:

$$\left| m_{ss} Y_s \right|_x - \left| m_{ss} Y_s \right|_{x+\Delta x} - K a_p (Y_s - Y_{se}) = \frac{d(m_{ss} Y_s)}{dt} \quad (10)$$

A Equação (10) descreve um balanço material de água no elemento de volume de leito anteriormente mencionado, onde o primeiro termo à esquerda da igualdade representa a entrada, enquanto que os dois seguintes denotam a saída de água devido à secagem e pela movimentação da esteira, respectivamente. À direita da igualdade observa-se o termo de acúmulo.

A Equação (10) pode ser melhorada, conforme a Equação (11), considerando-se que a vazão mássica do sólido é igual ao produto da densidade pelo volume do leito e, que ambos podem ser considerados constantes em relação a variação do tempo.

$$\left| m_{ss} Y_s \right|_x - \left| m_{ss} Y_s \right|_{x+\Delta x} - K a_p (Y_s - Y_{se}) = \rho_{ss} V_{ss} \frac{dY_s}{dt} \quad (11)$$

O volume total de matéria-prima ( $V_{leito}$ ) dentro do secador, é igual ao volume de vazios ( $V_v$ ), somado ao volume de sólidos ( $V_s$ ).

$$V_{leito} = V_v + V_s \quad (12)$$

Rearranjando:

$$V_v = V_{leito} - V_s \quad (13)$$

Pode-se sugerir que a porosidade do leito de erva-mate não é constante ao longo do secador, pois a medida que a erva vai secando, ocorre uma contração (acomodação das folhas) natural no volume do leito poroso. Por outro lado, como o produto dentro do secador já passou por uma pré-secagem para desativação enzimática, esta variação no volume pode ser considerada mínima e desprezível. Sendo assim, a porosidade ( $\varepsilon$ ) é resultante do volume de vazios dividido pelo volume total do leito, conforme demonstrado pela Equação (14).

$$\varepsilon = \frac{V_v}{V_{leito}} \quad (14)$$

Substituindo a Equação (13) na Equação (14), tem-se:

$$\varepsilon = \frac{V_{leito} - V_s}{V_{leito}} \quad (15)$$

Isolando o volume do leito:

$$V_{\text{leito}} = \frac{V_s}{(1 - \varepsilon)} \quad (16)$$

Dividindo a Equação (11) pelo volume do leito tem-se que:

$$\frac{|m_{ss} Y_s|_x - |m_{ss} Y_s|_{x+\Delta x}}{V_{\text{leito}}} - Ka(Y_s - Y_{se}) = \rho_{ss}(1 - \varepsilon) \frac{dY_s}{dt} \quad (17)$$

Onde:

$$a = \frac{a_p}{V_{\text{leito}}} \quad (18)$$

$$(1 - \varepsilon) = \frac{V_s}{V_{\text{leito}}} \quad (19)$$

A vazão mássica ( $m_{ss}$ ) pode ser considerada igual ao produto da densidade do sólido seco ( $\rho_{ss}$ ) pela vazão volumétrica de sólido ( $Q_s$ ):

$$m_{ss} = \rho_{ss} Q_s \quad (20)$$

Substituindo a Equação (20) na Equação (17), tem-se:

$$\frac{|\rho_{ss} Q_s Y_s|_x - |\rho_{ss} Q_s Y_s|_{x+\Delta x}}{V_{\text{leito}}} - Ka(Y_s - Y_{se}) = \rho_{ss}(1 - \varepsilon) \frac{dY_s}{dt} \quad (21)$$

Sabe-se que a vazão volumétrica ( $Q_s$ ) é igual a área efetiva da seção da amostra ( $A_{ss}$ ) multiplicada pela velocidade do escoamento ( $u$ ). Neste caso, a velocidade do escoamento é obrigatoriamente a mesma da correia (esteira) do secador ( $u_c$ ):

$$Q_s = u_c A_{ss} \quad (22)$$

Substituindo a Equação (22) na Equação (21), tem-se que:

$$\frac{|\rho_{ss} u_c A_{ss} Y_s|_x - |\rho_{ss} u_c A_{ss} Y_s|_{x+\Delta x}}{V_{leito}} - Ka(Y_s - Y_{se}) = \rho_{ss} (1 - \varepsilon) \frac{dY_s}{dt} \quad (23)$$

Considerando-se “x”, dimensionalmente, o eixo de evolução da esteira a área da seção da amostra ( $A_{ss}$ ) é dada pela multiplicação dos eixos “y” e “z”, ou seja, o produto de entre  $\Delta y$  e  $\Delta z$ , respectivamente. Consequentemente o volume total da amostra ( $V_{leito}$ ) é dado pelo produto  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  e  $\Delta z$ . Cabe ressaltar que a área efetiva da seção de sólido propriamente dito, leva em consideração a porosidade do leito, ou seja, é igual a área inteira multiplicada pela porosidade ( $\varepsilon$ ); então:

$$V_{leito} = \Delta x \Delta y \Delta z \quad (24)$$

$$A_{total} = \Delta y \Delta z \quad (25)$$

$$A_{ss} = A_{total} (1 - \varepsilon) \quad (26)$$

Substituindo alguns dos termos da Equação (23) pelas Equações (24), (25) e (26), obtém-se:

$$\frac{|\rho_{ss} u_c (1 - \varepsilon) \Delta y \Delta z Y_s|_x - |\rho_{ss} u_c (1 - \varepsilon) \Delta y \Delta z Y_s|_{x+\Delta x}}{\Delta x \Delta y \Delta z} - Ka(Y_s - Y_{se}) = \rho_{ss} (1 - \varepsilon) \frac{dY_s}{dt} \quad (27)$$

Rearranjando os termos:

$$\rho_{ss} u_c (1 - \varepsilon) \frac{|Y_s|_x - |Y_s|_{x+\Delta x}}{\Delta x} - Ka(Y_s - Y_{se}) = \rho_{ss} (1 - \varepsilon) \frac{dY_s}{dt} \quad (28)$$

Aplicando o limite ( $\Delta x \rightarrow 0$ ):

$$\left[ \frac{|Y_s|_x - |Y_s|_{x+\Delta x}}{\Delta x} \right] = - \frac{dY_s}{dt} \quad (29)$$

Dividindo-se ambos os lados da igualdade por  $\rho_{ss}(1-\varepsilon)$  obtém-se a expressão final para o balanço de massa para a água:

$$\frac{\partial Y_s}{\partial t} = -u_c \frac{\partial Y_s}{\partial x} - C_s (Y_s - Y_{se}) \quad (30)$$

Em que:

$$C_s = \frac{Ka}{(1-\varepsilon)\rho_{ss}} \quad (31)$$

### 3.2.2 Balanço de energia na fase sólida do secador

De forma análoga à Equação (11), o primeiro e o segundo termo da Equação (32) representam a entrada e a saída de energia devido ao movimento da esteira. O terceiro termo é o calor cedido por convecção pelo fluído para a fase sólida, enquanto o quarto é a energia necessária para evaporação e aquecimento do vapor d'água transportado para a fase fluída. À direita da igualdade encontra-se o termo de acúmulo de energia.

$$\begin{aligned} & \left[ m_{ss} C_{p_{ss}} (T_s - T_r) + m_{ss} Y_s C_{p_l} (T_s - T_r) \right]_x \\ & - \left[ m_{ss} C_{p_{ss}} (T_s - T_r) + m_{ss} Y_s C_{p_l} (T_s - T_r) \right]_{x+\Delta x} \\ & + h a_p (T_g - T_s) - K a_p (Y_s - Y_{se}) [C_{p_g} (T_g - T_s) + \lambda] \\ & = \rho_{ss} V_s \frac{d \{ [C_{p_{ss}} (T_s - T_r) + Y_s C_{p_l} (T_s - T_r)] \}}{dt} \end{aligned} \quad (32)$$

A Equação (33) é resultado da divisão da Equação (32) pelo volume do leito (Equação 24) e representação da vazão mássica pela Equação (20), (22), (25) e (26):



$$\begin{aligned}
& \left| \frac{\rho_{ss} u_c (1-\varepsilon) \Delta y \Delta z C_{p_{ss}} T_s + \rho_{ss} u_c (1-\varepsilon) \Delta y \Delta z Y_s C_{p_l} T_s}{\Delta x \Delta y \Delta z} \right|_x + h_a (T_g - T_s) - \\
& \left| \frac{\rho_{ss} u_c (1-\varepsilon) \Delta y \Delta z C_{p_{ss}} T_s + \rho_{ss} u_c (1-\varepsilon) \Delta y \Delta z Y_s C_{p_l} T_s}{\Delta x \Delta y \Delta z} \right|_{x+\Delta x} - Ka (Y_s - Y_{se}) \quad (33)
\end{aligned}$$

$$[C_{p_g} (T_g - T_s) + \lambda] = \rho_{ss} (1-\varepsilon) \frac{d[(C_{p_{ss}} + Y_s C_{p_l}) T_s]}{dt}$$

Rearranjando os termos e aplicando o limite ( $\Delta x \rightarrow 0$ ):

$$\begin{aligned}
& -\rho_{ss} u_c (1-\varepsilon) C_{p_{ss}} \frac{\partial T_s}{\partial x} - \rho_{ss} u_c (1-\varepsilon) C_{p_l} \frac{\partial (Y_s T_s)}{\partial x} + h_a (T_g - T_s) - \\
& Ka (Y_s - Y_{se}) [C_{p_g} (T_g - T_s) + \lambda] = \rho_{ss} (1-\varepsilon) \frac{\partial [(C_{p_{ss}} + Y_s C_{p_l}) T_s]}{\partial t} \quad (34)
\end{aligned}$$

Dividindo-se ambos os lados da Equação (34) por  $\rho_{ss}(1-\varepsilon)$ :

$$\begin{aligned}
& -u_c C_{p_{ss}} \frac{\partial T_s}{\partial x} - u_c C_{p_l} Y_s \frac{\partial (T_s)}{\partial x} - u_c C_{p_l} T_s \frac{\partial (Y_s)}{\partial x} + h_m (T_g - T_s) - \\
& C_s (Y_s - Y_{se}) [C_{p_g} (T_g - T_s) + \lambda] = (C_{p_{ss}} + Y_s C_{p_l}) \frac{\partial T_s}{\partial t} + (T_s C_{p_l}) \frac{\partial Y_s}{\partial t} \quad (35)
\end{aligned}$$

$$\text{Onde } h_m = \frac{h_a}{(1-\varepsilon)\rho_{ss}} \quad ;$$

Rearranjando os termos:

$$\begin{aligned}
& -u_c (C_{p_{ss}} + C_{p_l} Y_s) \frac{\partial T_s}{\partial x} + h_m (T_g - T_s) - C_s (Y_s - Y_{se}) [C_{p_g} (T_g - T_s) + \lambda] = \\
& (C_{p_{ss}} + Y_s C_{p_l}) \frac{\partial T_s}{\partial t} + (T_s C_{p_l}) \left( u_c \frac{\partial Y_s}{\partial x} + \frac{\partial Y_s}{\partial t} \right) \quad (36)
\end{aligned}$$

Substituindo a Equação (30), resultante do balanço de massa, na Equação (36), tem-se com resultado a expressão final do balanço de energia na fase sólida do secador:

$$\begin{aligned}
 & -u_c(Cp_{ss} + Cp_l Y_s) \frac{\partial T_s}{\partial x} + h_m(T_g - T_s) - C_s(Y_s - Y_{se}) \\
 & [Cp_g(T_g - T_s) + \lambda - Cp_l T_s] = (Cp_{ss} + Y_s Cp_l) \frac{\partial T_s}{\partial t}
 \end{aligned} \tag{37}$$

### 3.2.3 Equações do balanço de massa e energia na fase fluída

Abaixo são apresentadas as equações resultantes do balanço de massa do soluto (Equação 38) e energia (Equação 39) na fase fluída (ex.; CALÇADA et al., 1993).

$$G_g \frac{\partial Y_g}{\partial z} = Ka(Y_s - Y_{se}) \tag{38}$$

$$G_g(Cp_g + Y_g Cp_v) \frac{\partial T_g}{\partial z} = - \left[ h_a + \frac{Cp_v}{2} Ka(Y_s - Y_{se}) \right] (T_g - T_s) \tag{39}$$

A Equação (39) pode ser reduzida para a forma apresentada na Equação (40) considerando-se que estudos preliminares tem demonstrado que a energia cedida pelo gás para aquecer o vapor liberado pela folha durante a secagem  $(Cp_v/2)Ka(Y_s - Y_{se})(T_g - T_s)$  é significativamente inferior ao calor consumido pelo aquecimento dos sólidos  $h_a(T_g - T_s)$  (CALÇADA et al., 1993).

$$G_g(Cp_g + Y_g Cp_v) \frac{\partial T_g}{\partial z} = -h_a(T_g - T_s) \tag{40}$$

### 3.2.4 Propriedades físico-químicas e de transferência de calor e massa

Como mencionado anteriormente, a simulação da secagem envolvendo o sistema de equações em questão demanda uma série de propriedades físico-químicas e de transferência de calor e massa. Como algumas estas propriedades dependem do produto que será submetido

a secagem (milho ou o arroz com casca), para ambos os casos serão apresentados distintas equações empregadas para a estimativa de cada variável de interesse.

Pode-se observar inicialmente que a obtenção de perfis de umidade e temperatura do gás e do sólido depende do conhecimento da umidade de equilíbrio ( $Y_{se}$ ) que no caso do milho será determinada pela Equação (41) (CALÇADA et al., 1993) e do arroz, pela Equação (42) (ZARE & CHEN, 2009). Calçada et al. (1993) não apresentam a faixa de validade da Equação (41), mas a utilizam em temperaturas do gás variando de aproximadamente 30 a 90°C. A Equação (42) é por sua vez válida para temperaturas inferiores à 50°C (ZARE & CHEN, 2009). Os coeficientes A, B e C da Equação (42) são calculados conforme as Equações (43), (44) e (45), respectivamente.

$$Y_{se} = \frac{1}{100} \left[ \frac{-\ln(1-RH)}{3,82 \times 10^{-5} (1,8(T_g + 273,15) - 410)} \right]^{0,5} \quad (41)$$

$$Y_{se} = 0,001 \left( \frac{A}{B} \right)^C \quad (42)$$

$$A = -\ln(1-RH)T_g \quad (43)$$

$$B = 2,67 \times 10^{-7} \left( 1 - \frac{T_g}{641,7} \right)^{-23,44} \quad (44)$$

$$C = \frac{1}{4 \times 10^5 (T_g)^{-2,12}} \quad (45)$$

A umidade de equilíbrio como visto acima, é determinada tanto pela temperatura do ar de secagem quanto pelo valor da umidade relativa, que por sua vez é calculada pela Equação (42).

$$RH = \left( \frac{760}{P_{sat}} \right) \left( \frac{Y_g}{0,625 + Y_g} \right) \quad (42)$$

A umidade relativa não só depende do valor da umidade do ar de secagem como também é inversamente proporcional à pressão de saturação do ar, que é dada pela Equação (43).

$$P_{\text{sat}} = \exp\left(18,3036 - \frac{3816,44}{T_g + 273,15 - 46,13}\right) \quad (43)$$

O calor específico do ar e do vapor d'água é dado pela Equação (44), empregando-se os coeficientes da Tabela 7.

$$C_{p_{g,v}} = e_1 + e_2 T_g + e_3 T_g^2 + e_4 T_g^3 + e_5 T_g^4 \quad (44)$$

A variação da viscosidade do ar em função da temperatura foi calculada de acordo com a Equação (45) e válida na faixa de temperatura entre -20 a 180°C (HOLMAN, 1983).

$$\mu_g = 1,935 \times 10^{-5} + 1,269 \times 10^{-8} T_g + 1,06 \times 10^{-10} T_g^2 \quad (45)$$

Os coeficientes volumétricos efetivos de transferência de massa e de calor do milho foram calculados conforme as Equações (46) e (47), respectivamente (CALÇADA et al., 1993; MANCINI et al., 1993).

Tabela 7. Coeficientes da Equação (44) para cálculo do calor específico do ar e vapor d'água.

	e <sub>1</sub>	e <sub>2</sub>	e <sub>3</sub>	e <sub>4</sub>	e <sub>5</sub>	Temperatura (°C)	Ref.
Ar	1005,60	7,31×10 <sup>-3</sup>	4,32×10 <sup>-4</sup>	-	-	0 a 300	Holman
Água	2423,93	-5,56	2,35×10 <sup>-2</sup>	-3,9×10 <sup>-5</sup>	2,39×10 <sup>-8</sup>	100 a 300	(1983)

$$Ka = 1,4275Y_s - 0,14 \quad (46)$$

$$ha = \frac{4,2865 \times 10^6}{60} \left[ \frac{60G_g (T_g + 273,15)}{P} \right]^{0,6011} \quad (47)$$

O coeficiente volumétrico efetivo de transferência de calor do arroz com casca foi calculado conforme a Equação (48), onde  $a_s$  representa a área superficial específica do grão do arroz com casca, que equivale à  $2437 \text{ m}^2 \text{ m}^{-3}$  (ZARE & CHEN, 2009).

$$h_a = 0,28 C_p G_g \left[ \frac{d_s G_g}{\mu_g} \right]^{-0,34} a_s \quad (48)$$

O coeficiente volumétrico efetivo de transferência de massa do arroz com casca foi obtido através de uma série de cálculos. Foi necessário encontrar uma equação para o coeficiente  $C_s$  do modelo de Lewis, representada pela Equação (52) (ZANOELO et al., 2007), capaz de representar os coeficientes X e Y do modelo de Pabis (Equação 49), o qual representa os dados experimentais de Zare e Chen (2009). Desta forma, primeiramente, para cada uma das temperaturas do ar ( $T_g$  igual a  $30^\circ\text{C}$ ,  $37^\circ\text{C}$ ,  $43^\circ\text{C}$  e  $50^\circ\text{C}$ ) foram calculados os valores dos parâmetros X e Y do modelo empírico de Pabis em umidades relativas (UR) iguais a 0,13, 0,40, 0,68 e 0,95. Dezesesseis pares de parâmetros X e Y foram obtidos através das Equações (50) e (51), respectivamente. Cada par de parâmetros foram gerados perfis de umidade adimensional (MR) em função do tempo de secagem no intervalo 0 a 150 min e ajustados os respectivos coeficientes de transportes ( $C_s$ ) gerando a Equação (53). Estes valores de  $C_s$ , quando relacionados à densidade e porosidade do leito, resultam no coeficiente volumétrico efetivo de transferência de massa ( $K_a$ ), conforme a Equação (54).

$$MR = \exp(-Xt^Y) \quad (49)$$

$$X = 0,1579 \times 10^{-1} + 0,1746 \times 10^{-3} T_g - 0,1413 \times 10^{-1} RH \quad (50)$$

$$Y = 0,6545 + 0,2425 \times 10^{-2} T_g - 0,7886 \times 10^{-1} RH \quad (51)$$

$$MR = \exp(-C_s t) \quad (52)$$

$$C_s = \frac{(-2,354 \times 10^{-3} RH + 3,519 \times 10^{-3}) \exp[(1,237 \times 10^{-2} RH + 1,785 \times 10^{-2}) T_g]}{60} \quad (53)$$

$$K_a = C_s(1 - \varepsilon)\rho_s \quad (54)$$

O modelo definido pelas Equações (30), (37), (38) e (40) foi resolvido em plataforma Matlab aplicando o método das linhas. A dimensão do espaço que representa o comprimento da esteira foi discretizada, o que resultou em um novo sistema de equações cujas propriedades em diferentes posições da esteira são funções do tempo e espessura do leito. Os valores das propriedades em diferentes posições da esteira foram então obtidos para diferentes espessuras e diferentes tempos de secagem por diferenças finitas para trás.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Uma comparação entre os resultados obtidos pela simulação e os dados de Calçada et. al. (1993) para secagem de milho é apresentada nas Figuras 6, 7 e 8.

A Figura 6 apresenta os dados de umidade do sólido em função da altura em dois diferentes tempos de secagem (900 e 3600 s). Conforme observado, a umidade do sólido no topo do leito é maior do que o que está na base em ambos os tempo analisados. Esse fenômeno é explicado pelo fato de o ar seco que entra no secador reter primeiro a umidade do sólido na base do leito, chegando já parcialmente úmido ao atingir o topo do leito. Essa menor diferença de umidade entre o ar e o sólido no topo impede o ar de retirar mais umidade do sólido. Com relação ao efeito do tempo de secagem, este é sempre negativo, ou seja, em qualquer posição do leito a umidade do sólido será menor em tempos maiores, o que prontamente explica a posição relativa das curvas em diferentes tempos na Figura 6.

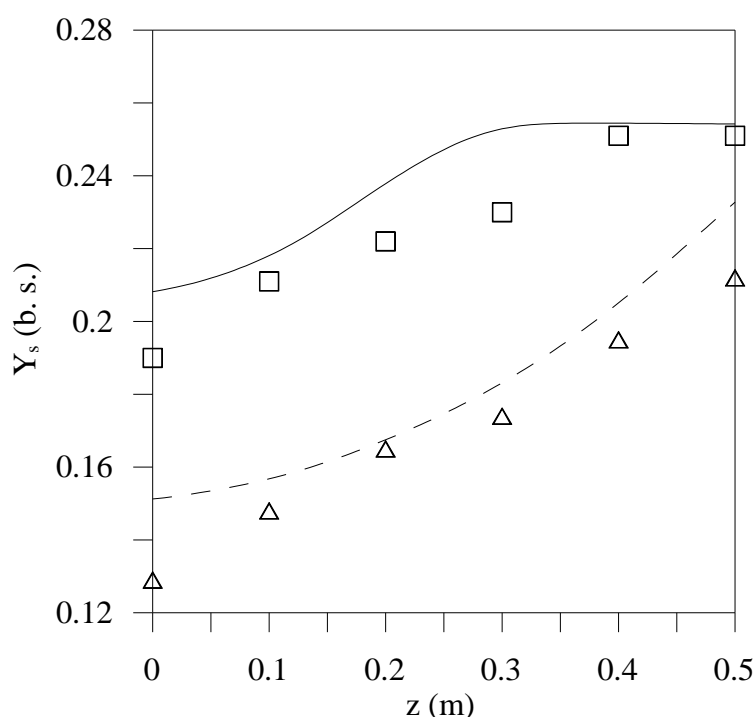


Figura 6. Comparação entre resultados experimentais (símbolos) e simulados (curvas) para a umidade do milho. Linha tracejada e triângulos referem-se a 60 minutos de secagem. Linha contínua e quadrados indicam resultados obtidos em 15 minutos.

A Figura 7 apresenta o perfil de variação da temperatura do ar de secagem em relação à altura do leito em dois diferentes tempos de processo (15 e 60 minutos). Conforme demonstrado, verifica-se que a temperatura do gás no topo do leito é sempre menor que na base, pois enquanto o ar percorre o leito existe uma troca de calor sensível e latente entre as fases fluida e sólida. Com relação à temperatura do gás para uma altura fixa qualquer, observa-se que ela sempre foi menor em 15 min de secagem do que em 60 min. Isso se deve ao fato de que em tempos menores o ar está em contato com um sólido mais frio e úmido, de maneira que a taxa de transferência de calor entre as fases é maior, diminuindo a sua temperatura se comparado com tempos maiores. A tendência é que depois de um determinado tempo, no final do processo, a temperatura do ar em qualquer posição atinja a temperatura do ar na base, visto que o sólido atingirá a umidade de equilíbrio e encontrar-se-á em uma condição de equilíbrio térmico.

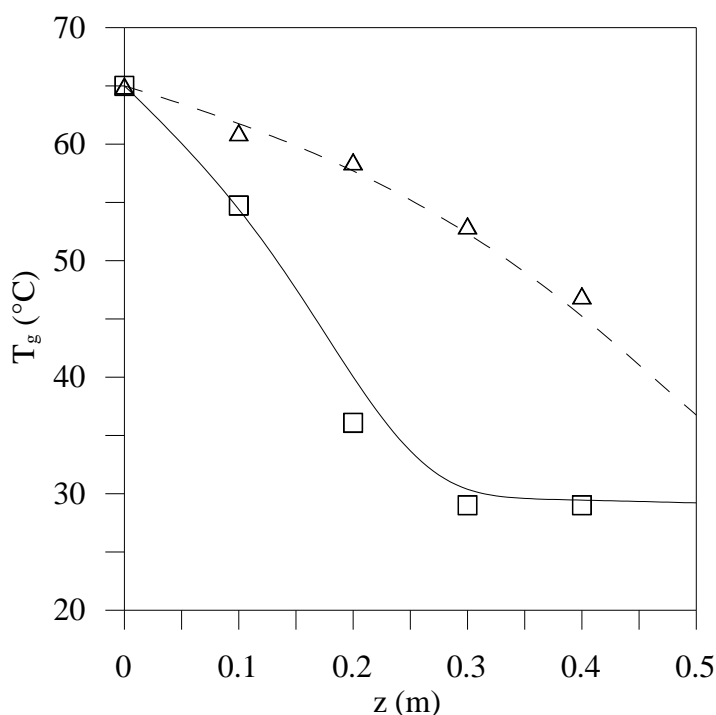


Figura 7. Comparação entre resultados experimentais (símbolos) e simulados (curvas) para a temperatura do ar na secagem de milho. Linha tracejada e triângulos referem-se a 60 minutos de secagem. Linha contínua e quadrados indicam resultados obtidos em 15 minutos.

Diferentemente das figuras anteriores, a Figura 8 demonstra o perfil de umidade do ar de secagem no topo do leito (0,5 m) em função do tempo. A redução de umidade do sólido provoca inicialmente um incremento da umidade da fase gás, pois ocorre transferência de



massa da fase sólida para a fluida. Quando a umidade do sólido encontra-se próxima à umidade de equilíbrio, a taxa de transferência de massa do soluto é reduzida a aproximadamente zero e a umidade do gás permanece constante por um curto período de tempo. Como o gás no interior da câmara está sempre se renovando, a umidade do mesmo tende a aproximar-se da umidade de alimentação, ou seja, tende a reduzir ao seu valor de umidade inicial.

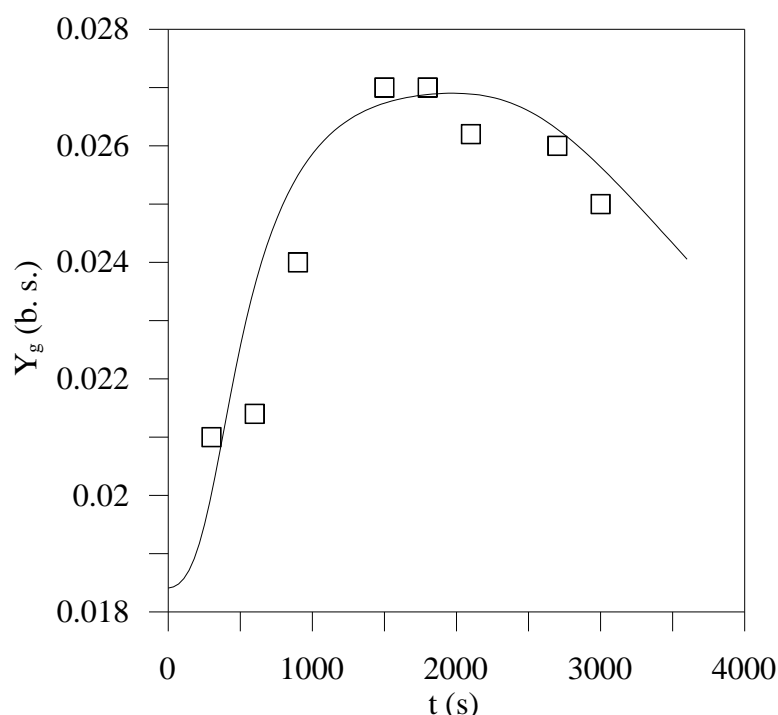


Figura 8. Comparação entre a umidade estimada (curva) e experimental (símbolos) do ar na saída do leito da secagem de milho.

As Figuras 9, 10 e 11 apresentam comparações entre as respostas de interesse geradas com o modelo e resultados experimentais análogos para secagem de arroz com casca. Na Figura 9 observa-se a variação da umidade do sólido (arroz com casca) ao longo do processo de secagem em duas diferentes alturas do leito – 8 a 9 cm e 17 a 18 cm. Novamente comprova-se que o sólido no topo de um leito de camada espessa sempre demandará maiores tempos de secagem para atingir a condição de equilíbrio. Em síntese, como esperado, os grãos nas alturas de 8 a 9 centímetros estarão sempre mais secos do que os grãos presentes na altura de 17 a 18 centímetros. A maior secagem na camada inferior e o retardamento na camada superior em baixa umidade relativa, resultando no gradiente de umidade das sementes no final da secagem também foram observados por Eichol e Peres (2008) no monitoramento da qualidade física de secagem de sementes de milho em secadores estacionários.

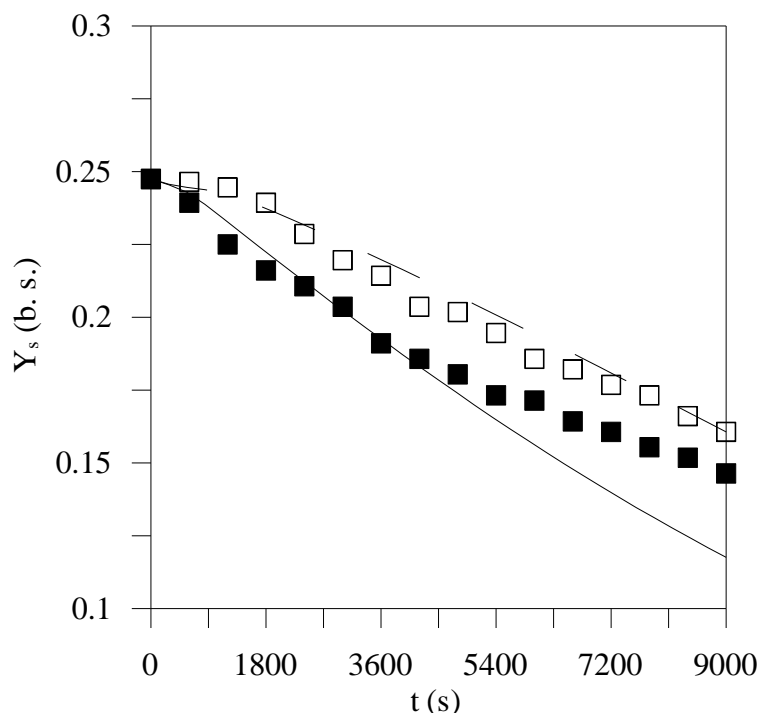


Figura 9. Comparação entre resultados experimentais (símbolos) e simulados (curvas) para a umidade do arroz com casca. Resultados calculados (linha sólida) e experimentais (quadrado sólido) – na espessura de 8 a 9 cm; Resultados calculados (linha tracejada) e experimentais (quadrado vazado) – na espessura de 17 a 18 cm.

De modo similar ao que é reportado na Figura 9, a Figura 10 apresenta a variação da umidade do ar de secagem em diferentes espessuras (8 a 9 cm, 17 a 18 cm e, 24 a 25 cm). Como no caso da figura análoga para o milho (Figura 8), a umidade do gás aumenta no início da secagem até um valor máximo e em seguida é reduzida de forma aproximadamente linear. Conforme mencionado, a umidade do sólido é inicialmente transferida para a fase gás, mas como a taxa de secagem é reduzida com o tempo e o ar renova-se no interior da câmara, a umidade do gás tende a retornar ao seu valor inicial em longos tempos de operação.

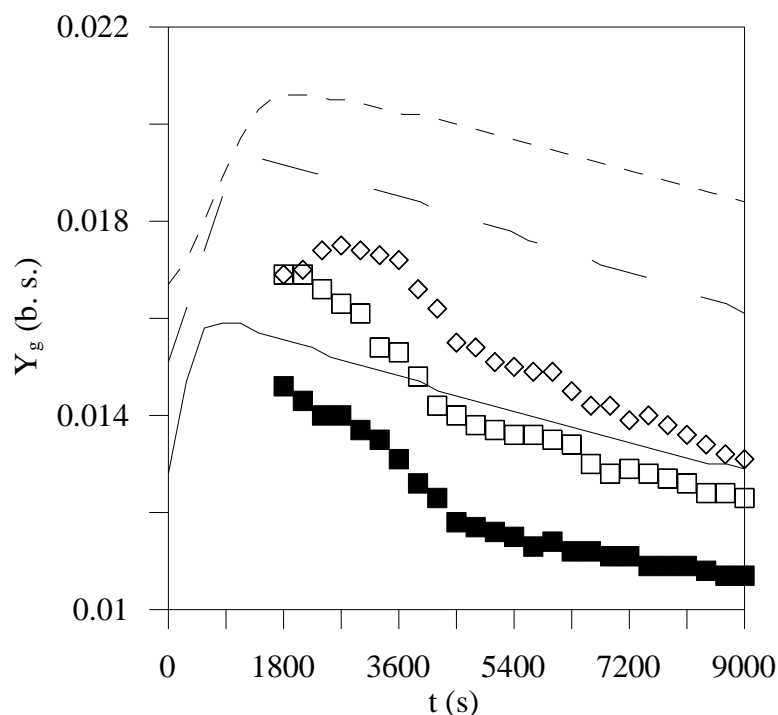


Figura 10. Comparação entre resultados experimentais (símbolos) e simulados (curvas) para a umidade do ar de secagem do arroz com casca. Resultados calculados (linha sólida) e experimentais (quadrado sólido) – na espessura de 8 a 9 cm; Resultados calculados (linha tracejada maior) e experimentais (quadrado vazado) – na espessura de 17 a 18 cm; Resultados calculados (linha tracejada menor) e experimentais (losango) – na espessura de 24 a 25 cm.

A Figura 11 reporta a variação da temperatura do ar de secagem em relação ao tempo de processo para as mesmas três diferentes espessuras da Figura 10. Em todas as curvas observa-se um incremento de temperatura, o que é natural visto que o gás contido no leito que estava inicialmente a temperatura ambiente é progressivamente substituído pelo ar quente. Também em todos os perfis a temperatura não aumenta infinitamente, mas tende a temperatura do gás de alimentação. Obviamente, pelas razões já alegadas a camada inferior de sólidos considerada é a primeira a atingir esta condição de equilíbrio.

Exceto por desvios pontuais no caso da secagem de arroz, o que é possivelmente causado por incertezas nas estimativas dos coeficientes de transporte de calor e massa, o modelo investigado foi capaz de reproduzir os resultados experimentais considerados sem ajuste de parâmetros. Deve-se também ressaltar que o efeito do tempo e da posição sobre todas as variáveis foi corretamente predito pelo modelo. Estes fatos corroboram a validade do modelo e da rotina computacional gerada para solução do sistema de equações diferenciais parciais que representa a secagem em secador batelada de camada espessa.

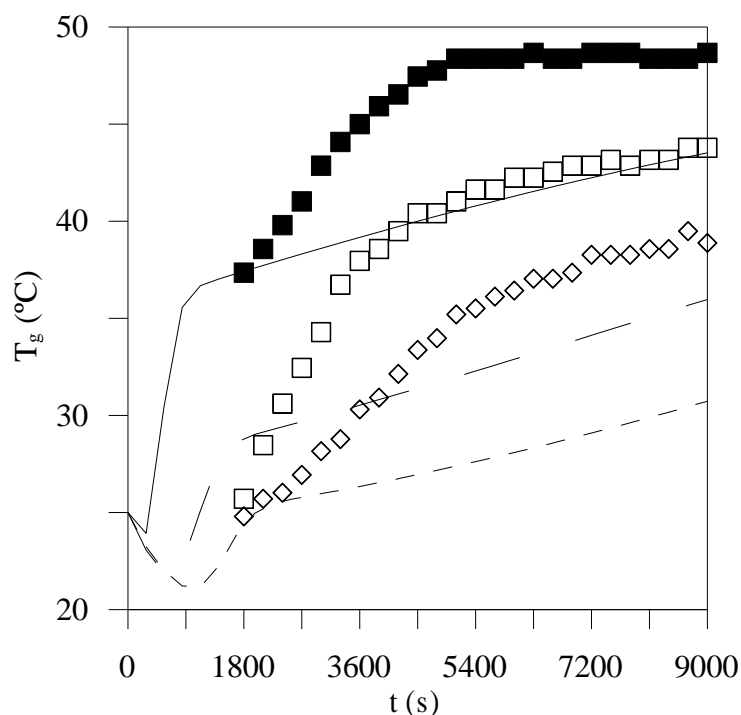


Figura 11. Comparação entre resultados experimentais (símbolos) e simulados (curvas) para a temperatura do ar de secagem do arroz com casca. Resultados calculados (linha sólida) e experimentais (quadrado sólido) – na espessura de 8 a 9 cm; Resultados calculados (linha tracejada maior) e experimentais (quadrado vazado) – na espessura de 17 a 18 cm; Resultados calculados (linha tracejada menor) e experimentais (losango) – na espessura de 24 a 25 cm.

Uma vez demonstrada a validação do modelo, seguem as figuras referentes aos resultados simulados e experimentais da secagem de erva-mate em leitos de diferentes espessuras.

As Figuras 12, 13 e 14, reportam a umidade do sólido nas secagens submetidas às condições do Experimento 1 (ver Tabela 4), porém diferem-se na espessura do leito, que por sua vez é equivalente à 0,05, 0,10 e 0,15 m respectivamente. As Figuras 15, 16 e 17, referem-se à umidade da erva-mate nas secagens sujeitas às condições do Experimento 2, igualmente nas respectivas espessuras de 0,05, 0,10 e 0,15 m. Por fim, a umidade do sólido também é reportada pelas Figuras 18, 19 e 20, porém nas condições de secagem do Experimento 3, mas para as mesmas espessuras de 0,05, 0,10 e 0,15 m respectivamente.

Em todas as figuras que descrevem a variação da umidade média do sólido em relação ao tempo de secagem, independentemente da espessura do leito e da temperatura do gás, é possível observar que o modelo matemático definido pelas Equações (30), (37), (38) e (40) é capaz de reproduzir os resultados experimentais. O modelo demonstra que à medida que as

folhas da erva-mate passam pelas diferentes posições da esteira, ou seja, com o decorrer do tempo de processo, há uma diminuição na umidade do sólido.

A literatura reporta inúmeros estudos com perfis temporais semelhantes de variação de umidade de folhas. Por exemplo, Reis et al. (2012) determinaram e descreveram matematicamente curvas de secagem de folhas de manjerição (*Ocimum basilicum* L.) nas temperaturas de 50°C, 60°C, 70°C e 80°C tanto para a secagem em infravermelho quanto para secagem em estufa com circulação de ar. Kaya e Aydin (2009), por sua vez, realizaram estudos experimentais sobre as características da secagem de ervas em leito de camada delgada. Em particular, foram comparados os comportamento da secagem das folhas de urtiga e de menta.

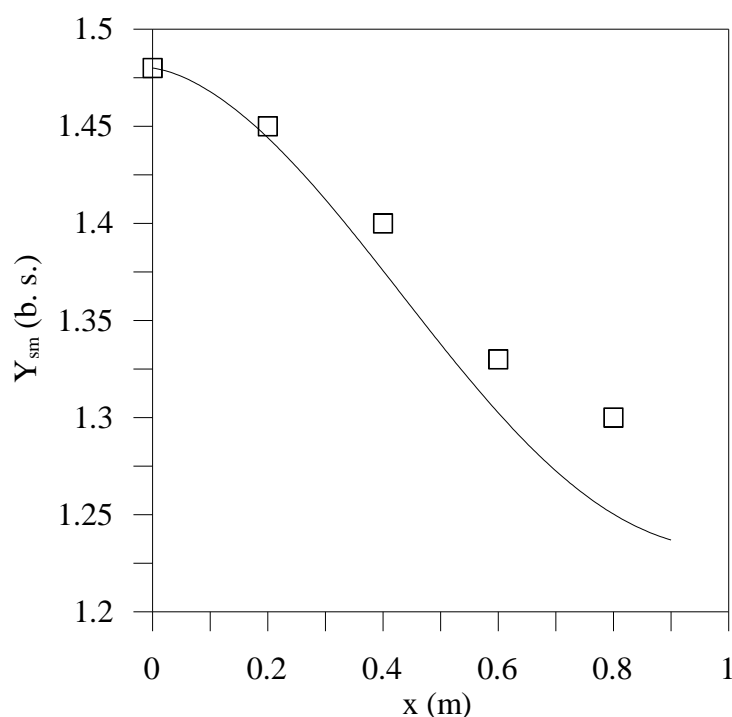


Figura 12. Comparação entre resultados experimentais (símbolos) e simulados (curvas) para a umidade do sólido na secagem da erva-mate em um leito de 0,05 m do Experimento 1.

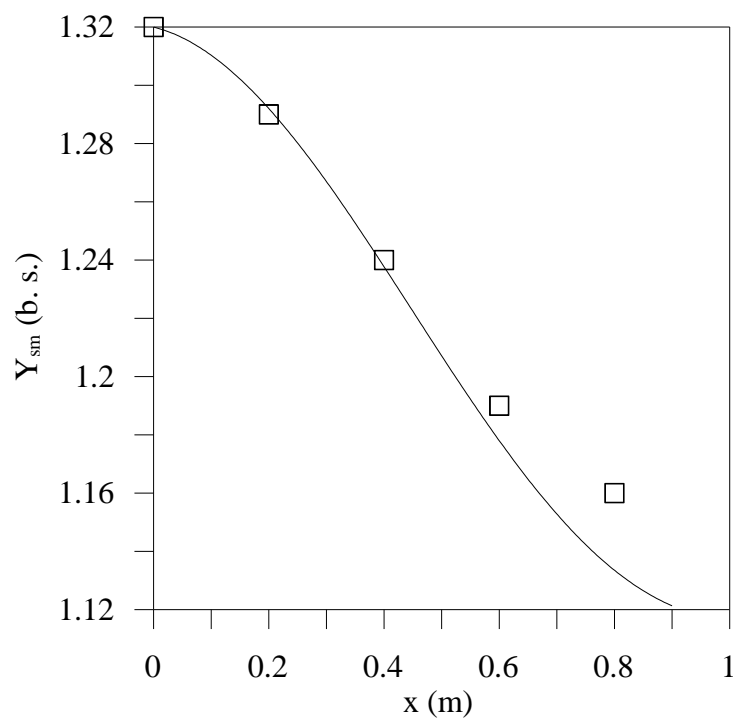


Figura 13. Comparação entre resultados experimentais (símbolos) e simulados (curvas) para a umidade do sólido na secagem da erva-mate em um leito de 0,10 m do Experimento 1.

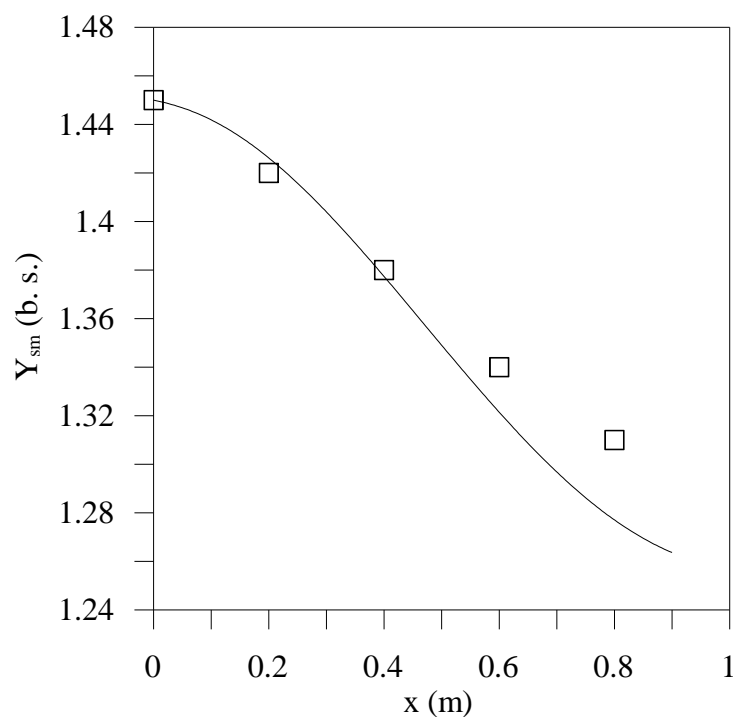


Figura 14. Comparação entre resultados experimentais (símbolos) e simulados (curvas) para a umidade do sólido na secagem da erva-mate em um leito de 0,15 m do Experimento 1.

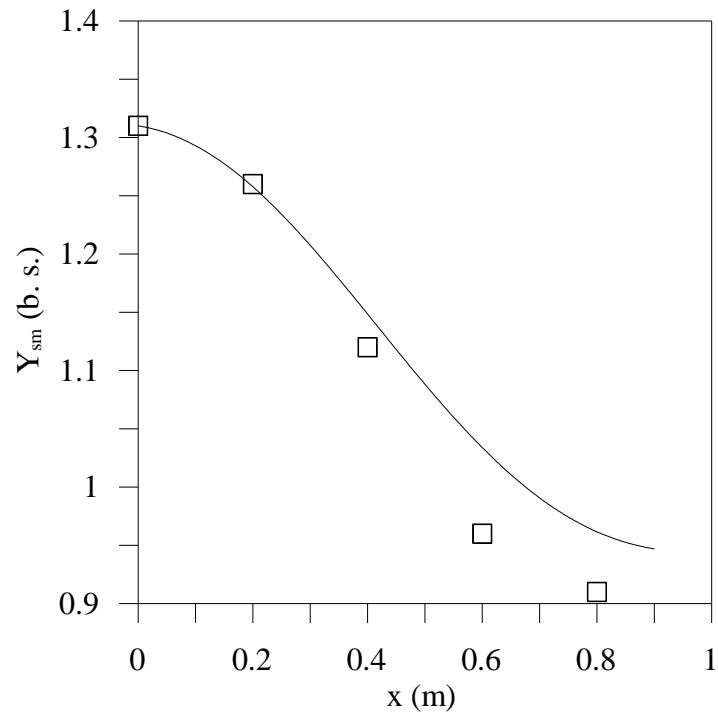


Figura 15. Comparação entre resultados experimentais (símbolos) e simulados (curvas) para a umidade do sólido na secagem da erva-mate em um leito de 0,05 m do Experimento 2.

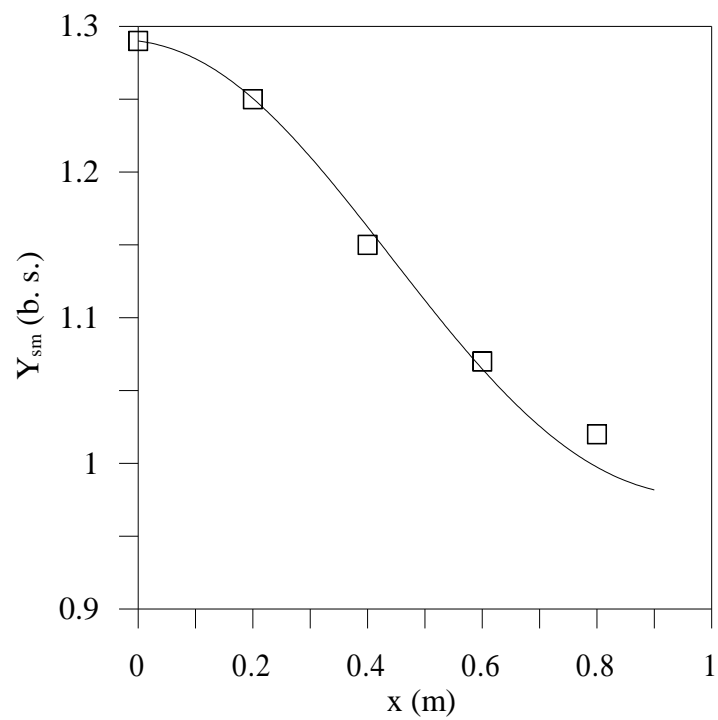


Figura 16. Comparação entre resultados experimentais (símbolos) e simulados (curvas) para a umidade do sólido na secagem da erva-mate em um leito de 0,10 m do Experimento 2.

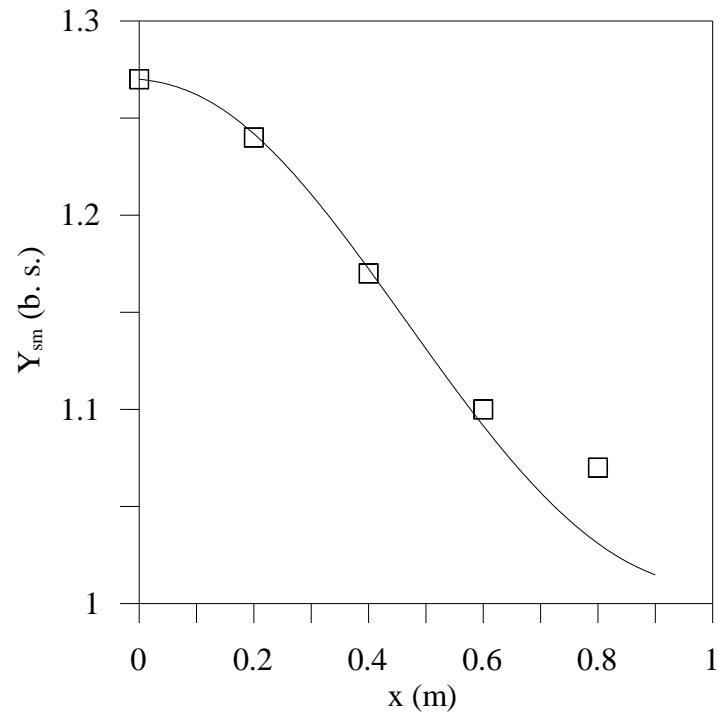


Figura 17. Comparação entre resultados experimentais (símbolos) e simulados (curvas) para a umidade do sólido na secagem da erva-mate em um leito de 0,15 m do Experimento 2.

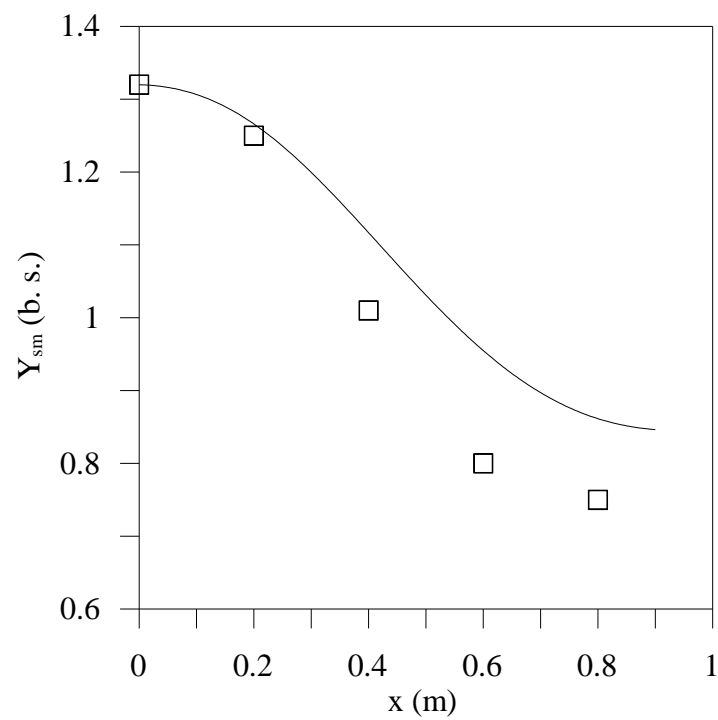


Figura 18. Comparação entre resultados experimentais (símbolos) e simulados (curvas) para a umidade do sólido na secagem da erva-mate em um leito de 0,05 m do Experimento 3.



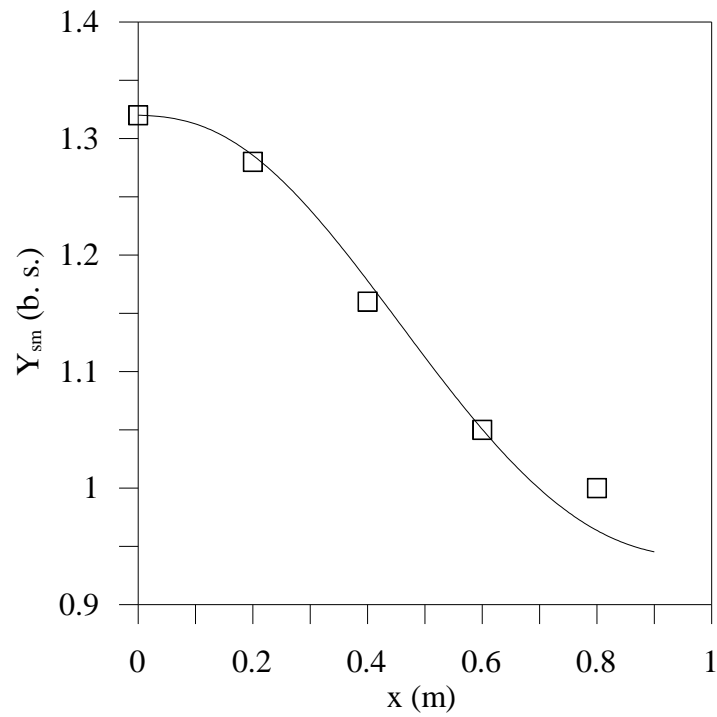


Figura 19. Comparação entre resultados experimentais (símbolos) e simulados (curvas) para a umidade do sólido na secagem da erva-mate em um leito de 0,10 m do Experimento 3.

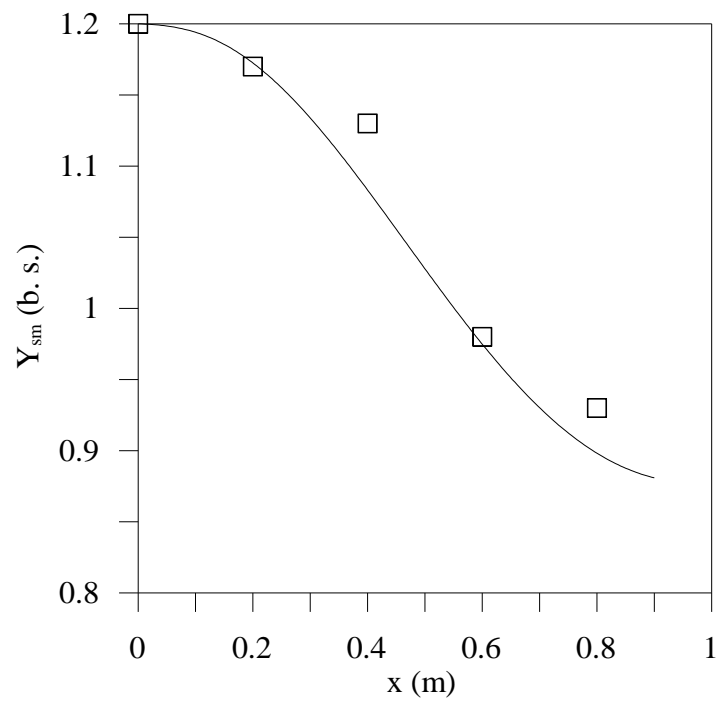


Figura 20. Comparação entre resultados experimentais (símbolos) e simulados (curvas) para a umidade do sólido na secagem da erva-mate em um leito de 0,15 m do Experimento 3.

Em se tratando da variável temperatura do sólido, os resultados experimentais e simulados em relação a diferentes posições da esteira, são reportados nas Figuras 21 a 29. Em especial, as Figuras 21, 22 e 23 se referem às secagens realizadas nas condições descritas pelo Experimento 1, em leitos de espessura iguais a 0,05, 0,10 e 0,15 m, respectivamente. As Figuras 24, 25 e 26 reportam curvas para a mesma variável de interesse e espessuras, porém nas condições de operação do Experimento 2. De forma análoga e em idênticas espessuras, os perfis de temperatura do sólido resultantes do Experimento 3 são apresentados nas Figuras 27, 28 e 29.

Em todos os casos considerados, os resultados calculados de temperatura do sólido seguem as mesmas tendências evidenciadas a partir dos experimentos. Pequenas diferenças entre os resultados teóricos e experimentais podem ser atribuídas as incertezas na medição das temperaturas com termômetro de infravermelho. Em todos os ensaios, a temperatura do sólido que se encontra próximo a entrada da esteira aumenta de maneira aproximadamente linear, o que ocorre devido à troca de calor entre o ar de secagem e as folhas, ocasionada pelo gradiente de temperatura entre os mesmos. Como a temperatura do gás na base do secador também possui um perfil parabólico na direção do escoamento do sólido, a temperatura do sólido tende à diminuir novamente quando este se aproxima da saída do secador.

Nesta altura cabe destacar que a variação de temperatura da fase sólida com o tempo na maioria dos secadores (isotérmicos) apresenta um crescimento assintótico, onde  $T_s$  tende a um máximo equivalente a temperatura da fase fluida. Este típico comportamento é evidenciado no trabalho de Hallajisani et al. (2013), os quais estudaram a secagem e aquecimento de papel a 120°C, 160 °C e 200 °C. Em todas as situações analisadas, observou-se inicialmente uma taxa aproximadamente constante de aumento de temperatura seguida de um período a taxa decrescente e finalmente a taxa zero. Nas investigações de Zanoelo (2007) e Zanoelo et al. (2008), de secagem de folhas de erva-mate em secadores de leito fluidizado e fixo de camada fina, perfis similares são evidenciados.

De qualquer forma, ainda que em secadores diferentes do presentemente investigado, perfis parabólicos de temperatura do sólido são evidenciados na literatura. Por exemplo, no trabalho de Meneghetti et al. (2012) um secador batelada para secagem de arroz apresenta uma curva de variação de temperatura similar as reportadas nas Figuras 21 a 29. Entretanto, ainda que este fato decorra essencialmente de uma condição não isotérmica de operação, a mudança de temperatura da fase sólida é causada pela adoção intencional de diferentes rampas de aquecimento da fase fluida, seguida de um ciclo de permanência do secador sem alimentação de ar.

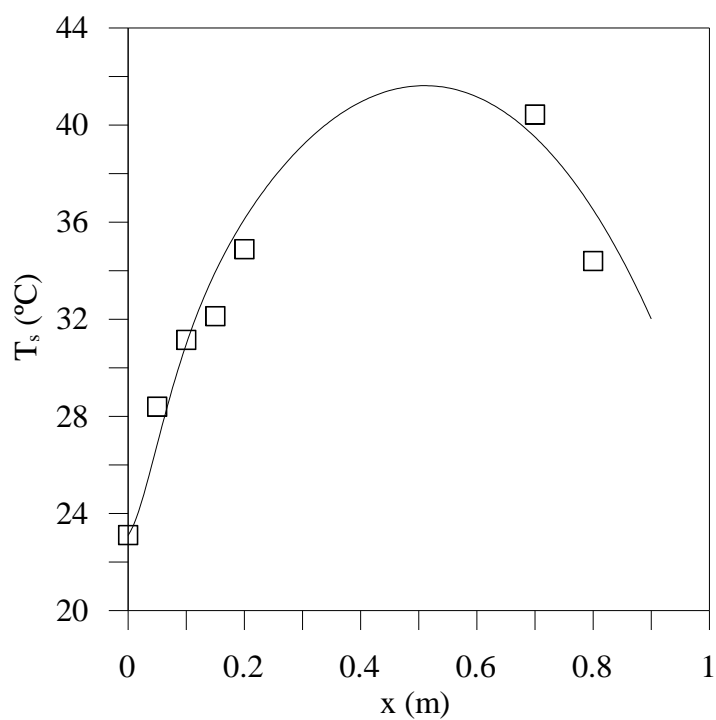


Figura 21. Comparação entre resultados experimentais (símbolos) e simulados (curvas) para a temperatura do sólido na secagem da erva-mate em um leito de 0,05 m do Experimento 1.

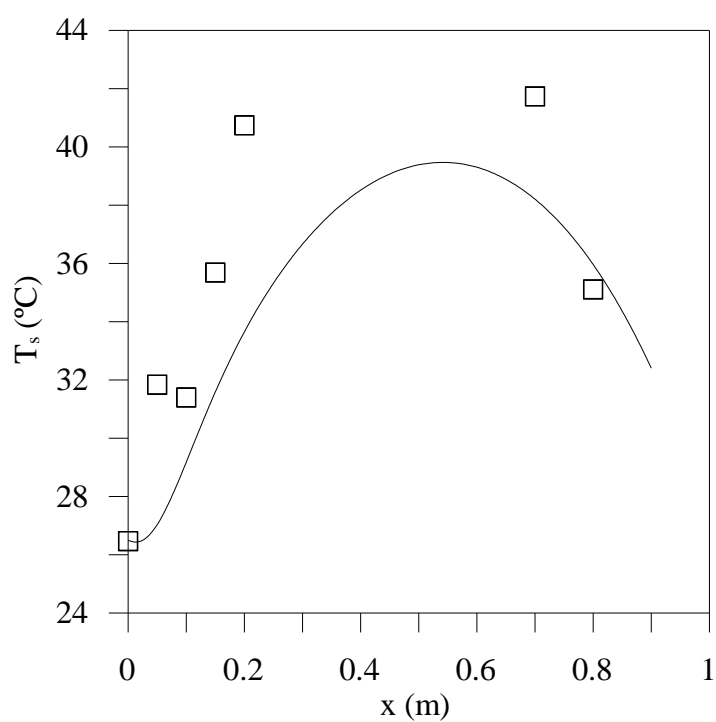


Figura 22. Comparação entre resultados experimentais (símbolos) e simulados (curvas) para a temperatura do sólido na secagem da erva-mate em um leito de 0,10 m do Experimento 1.

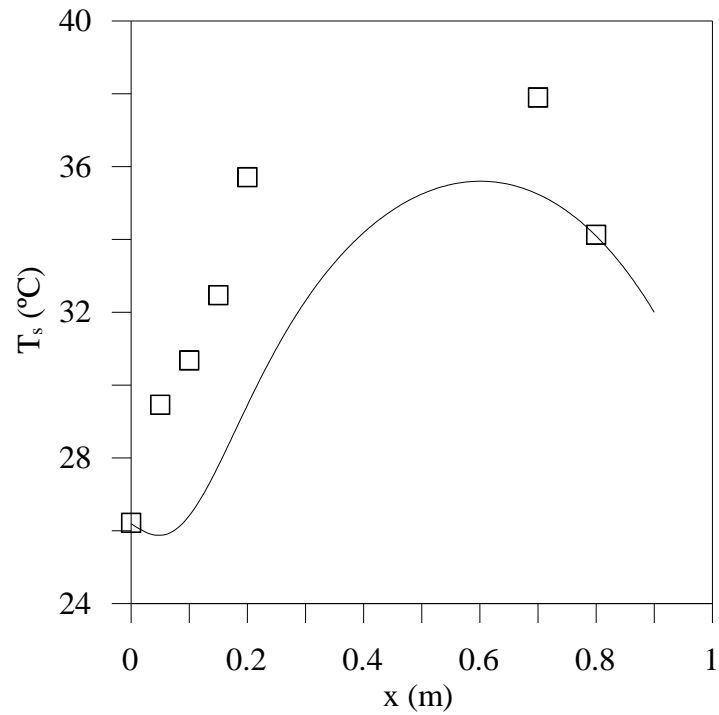


Figura 23. Comparação entre resultados experimentais (símbolos) e simulados (curvas) para a temperatura do sólido na secagem da erva-mate em um leito de 0,15 m do Experimento 1.

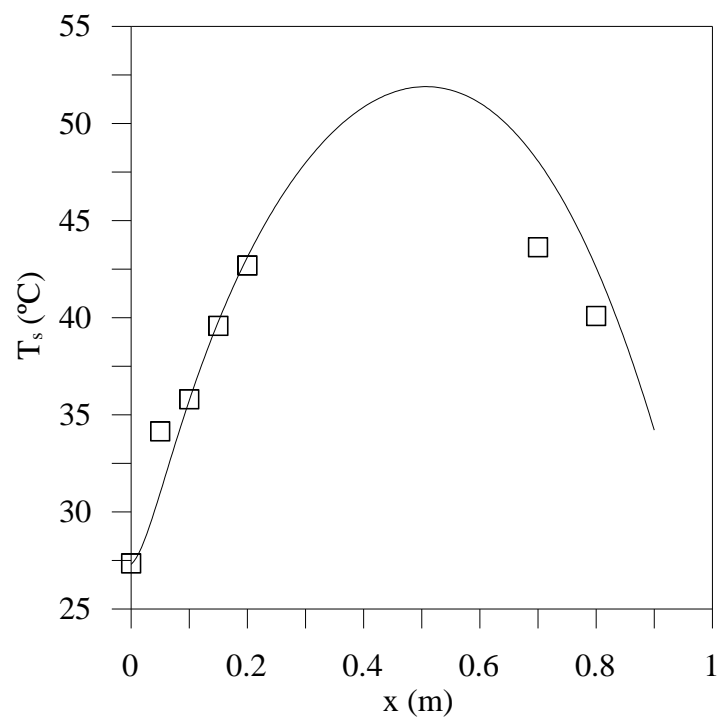


Figura 24. Comparação entre resultados experimentais (símbolos) e simulados (curvas) para a temperatura do sólido na secagem da erva-mate em um leito de 0,05 m do Experimento 2.

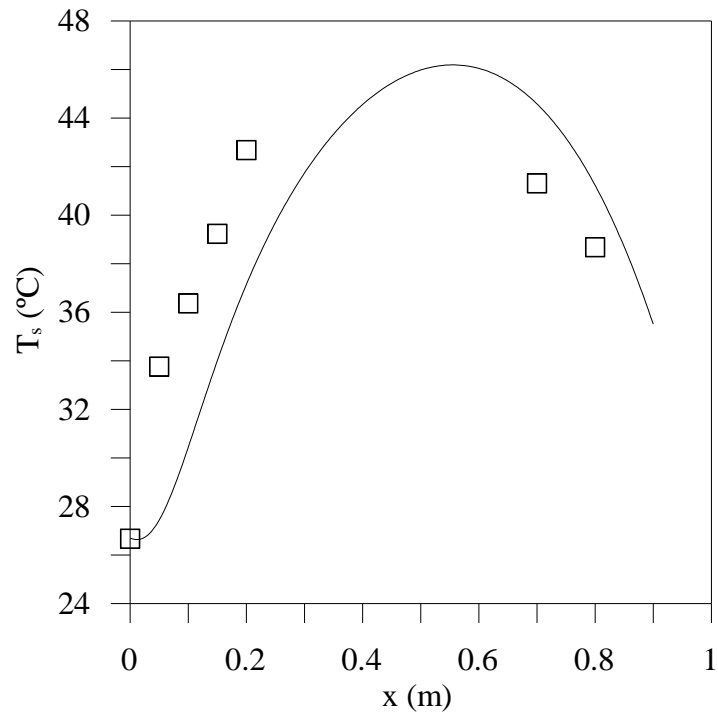


Figura 25. Comparação entre resultados experimentais (símbolos) e simulados (curvas) para a temperatura do sólido na secagem da erva-mate em um leito de 0,10 m do Experimento 2.

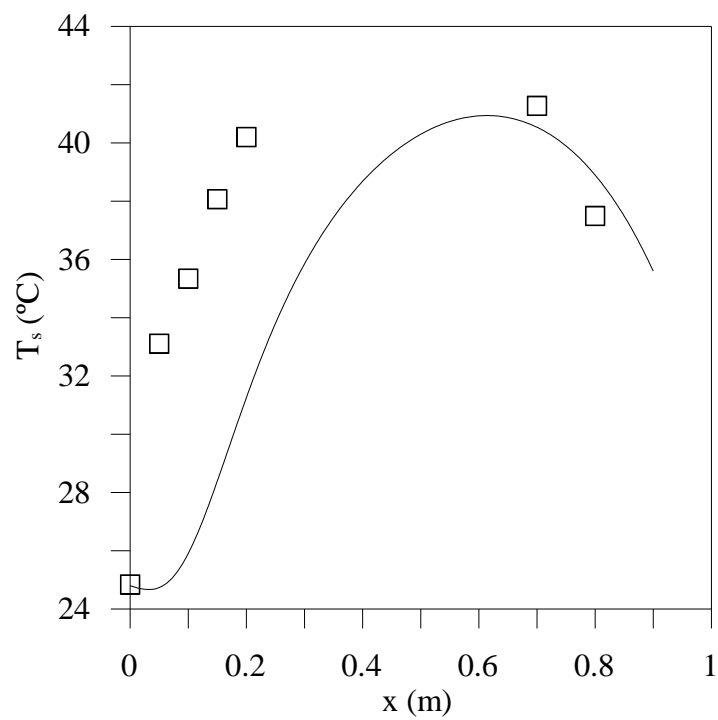


Figura 26. Comparação entre resultados experimentais (símbolos) e simulados (curvas) para a temperatura do sólido na secagem da erva-mate em um leito de 0,15 m do Experimento 2.

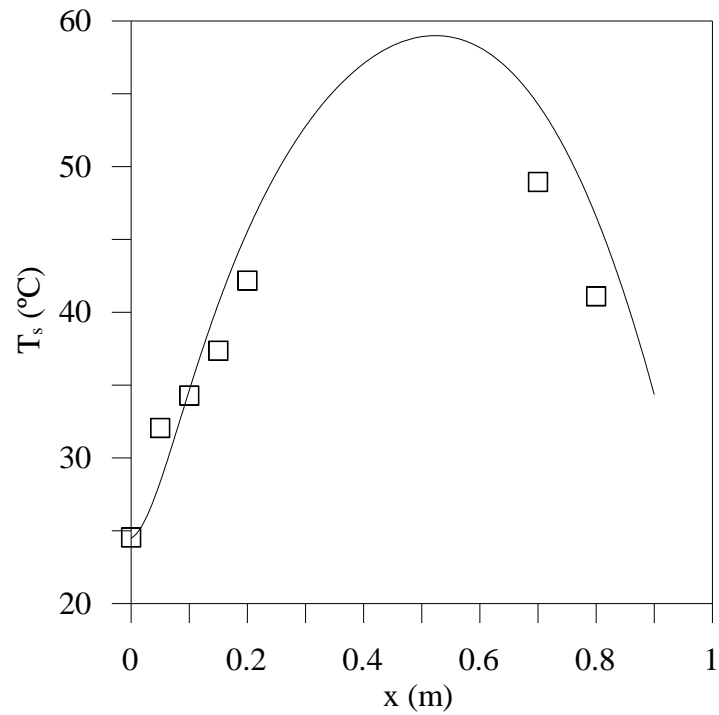


Figura 27. Comparação entre resultados experimentais (símbolos) e simulados (curvas) para a temperatura do sólido na secagem da erva-mate em um leito de 0,05 m do Experimento 3.

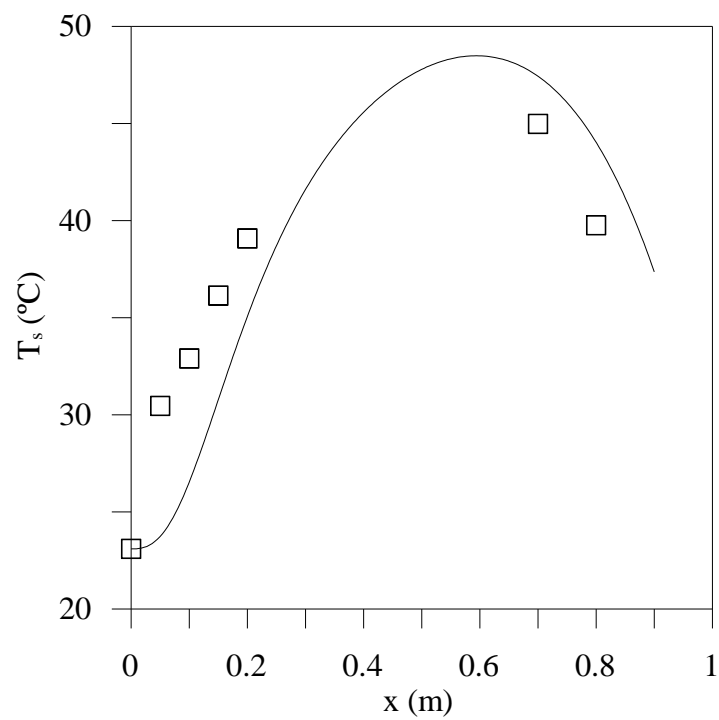


Figura 28. Comparação entre resultados experimentais (símbolos) e simulados (curvas) para a temperatura do sólido na secagem da erva-mate em um leito de 0,10 m do Experimento 3.

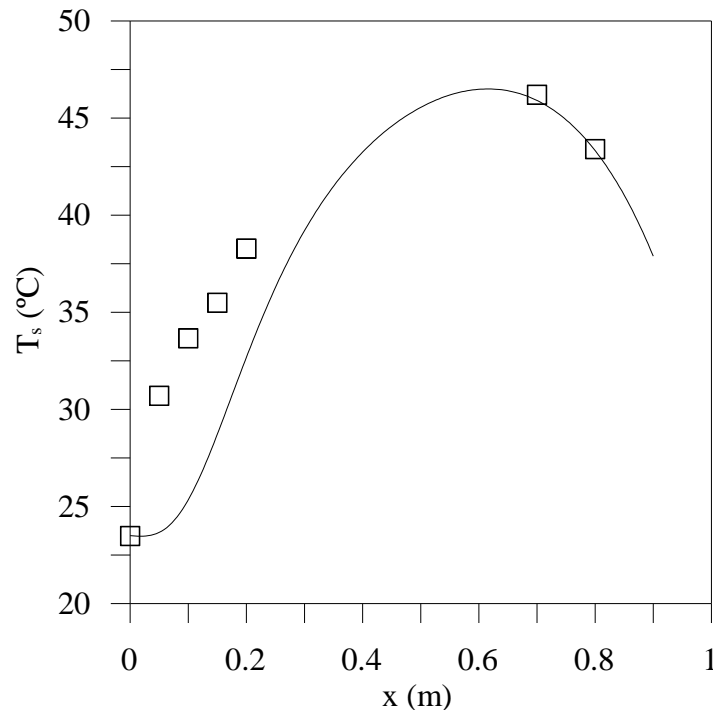


Figura 29. Comparação entre resultados experimentais (símbolos) e simulados (curvas) para a temperatura do sólido na secagem da erva-mate em um leito de 0,15 m do Experimento 3.

Conforme mencionado, a temperatura do ar de secagem na base possui um perfil parabólico na direção do escoamento do sólido. Este perfil tende a permanecer, independentemente das espessuras do leito e temperaturas iniciais, conforme demonstrado pelas Figuras 30, 31 e 32 (nas condições do Experimento 1), 33, 34 e 35 (nas condições do Experimento 2) e 36, 37 e 38 (nas condições do Experimento 3). Cabe aqui destacar, que apesar das diferentes condições dos ensaios, o modelo proposto descreve satisfatoriamente a variação da temperatura do gás.

Uma comparação entre as curvas experimentais ou calculadas de temperatura da fase gás e sólida em condições idênticas de operação, evidencia que  $T_g \geq T_s$  para qualquer coordenada  $x$  ou  $z$  ao longo da esteira. Este fato, é um elemento adicional que corrobora a validade do procedimento experimental e da metodologia de cálculo envolvidos na determinação da temperatura em ambas as fases.

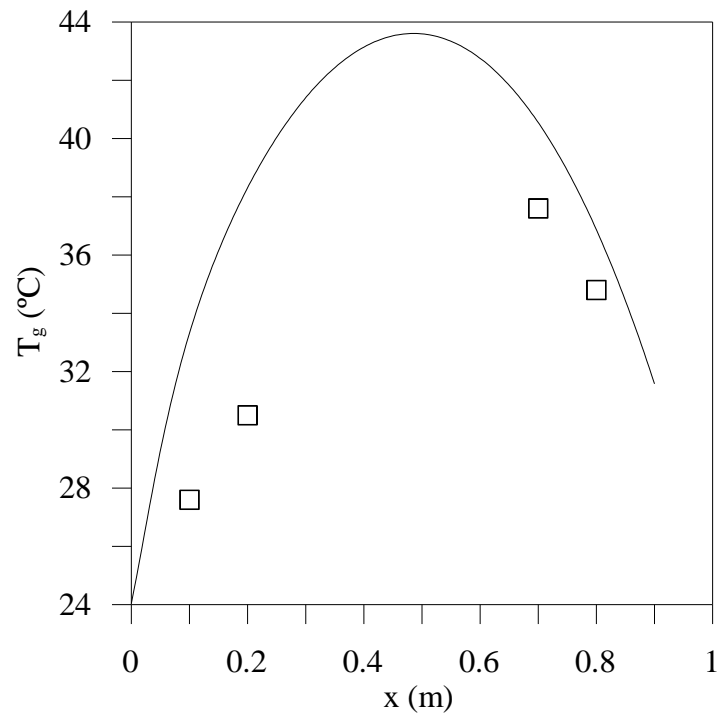


Figura 30. Comparação entre resultados experimentais (símbolos) e simulados (curvas) para a temperatura do gás na secagem da erva-mate em um leito de 0,05 m do Experimento 1.

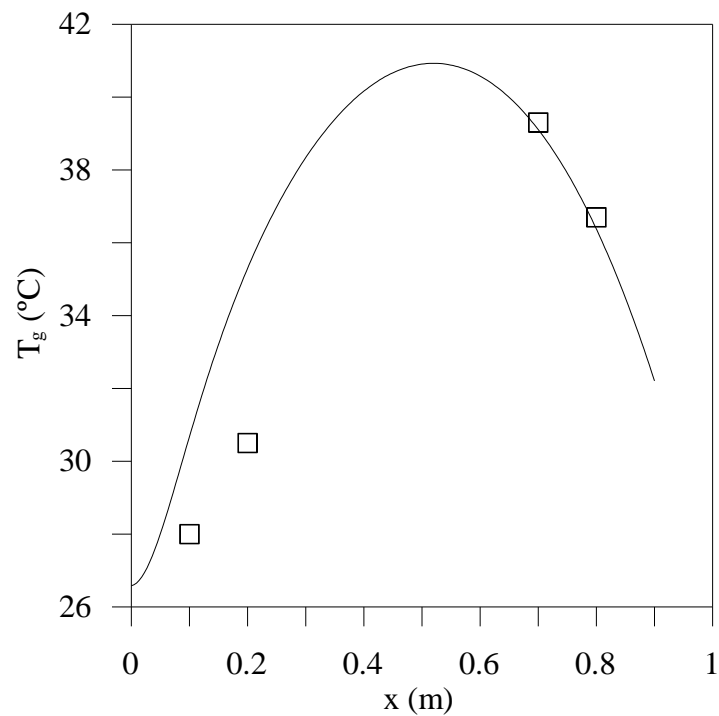


Figura 31. Comparação entre resultados experimentais (símbolos) e simulados (curvas) para a temperatura do gás na secagem da erva-mate em um leito de 0,10 m do Experimento 1.



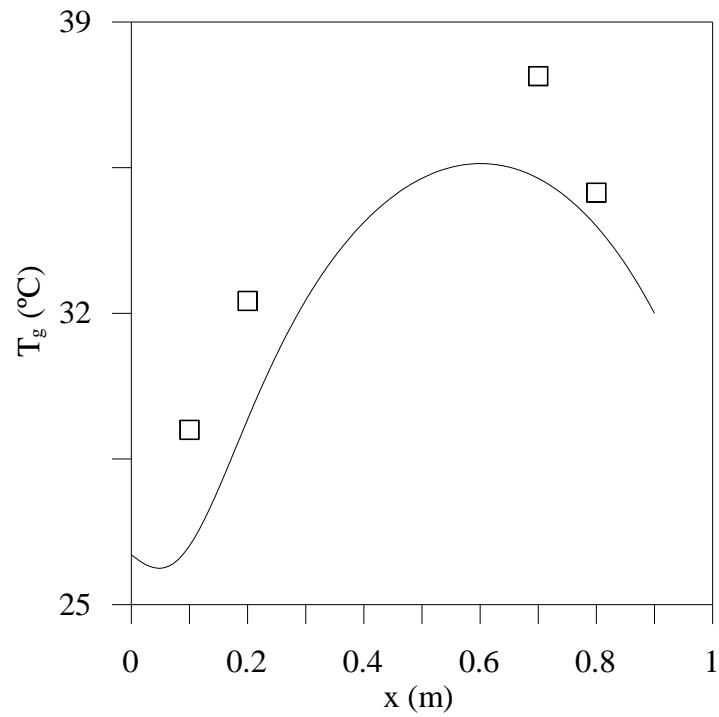


Figura 32. Comparação entre resultados experimentais (símbolos) e simulados (curvas) para a temperatura do gás na secagem da erva-mate em um leito de 0,15 m do Experimento 1.

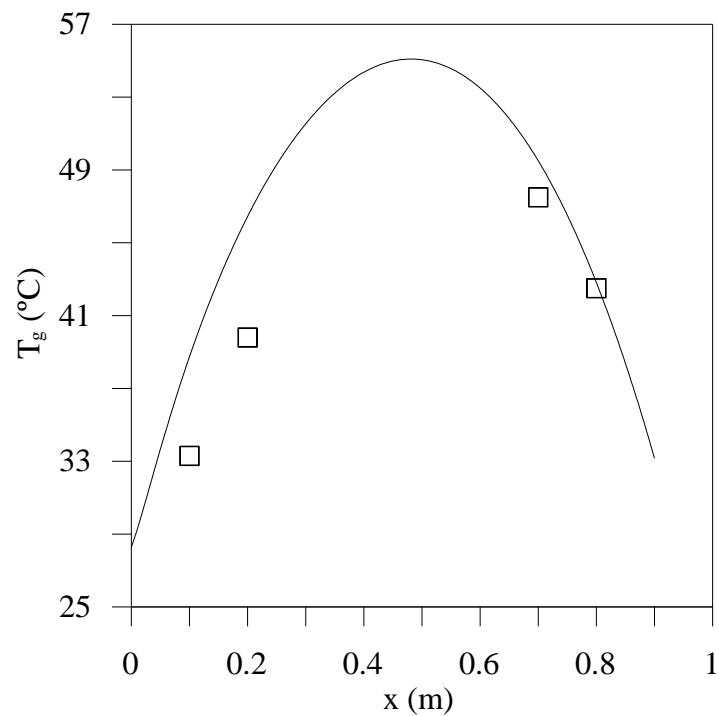


Figura 33. Comparação entre resultados experimentais (símbolos) e simulados (curvas) para a temperatura do gás na secagem da erva-mate em um leito de 0,05 m do Experimento 2.

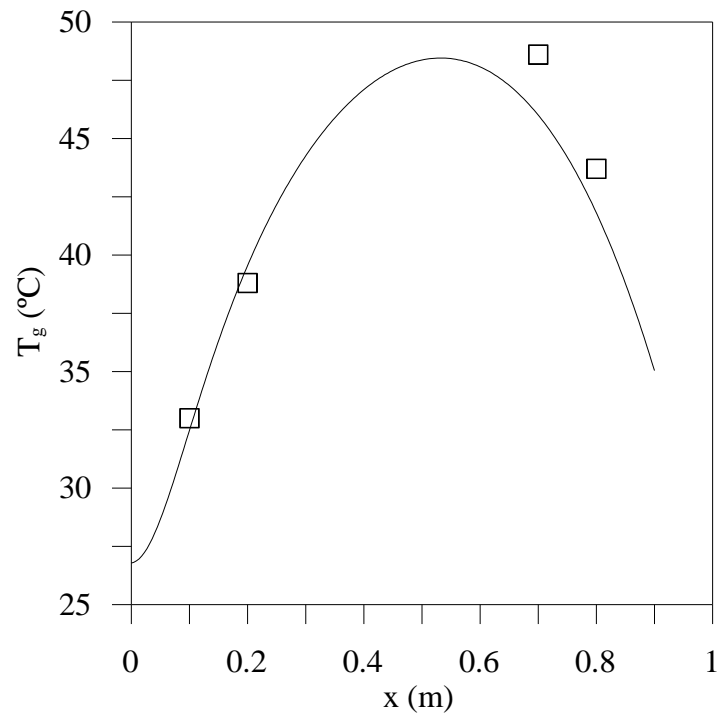


Figura 34. Comparação entre resultados experimentais (símbolos) e simulados (curvas) para a temperatura do gás na secagem da erva-mate em um leito de 0,10 m do Experimento 2.

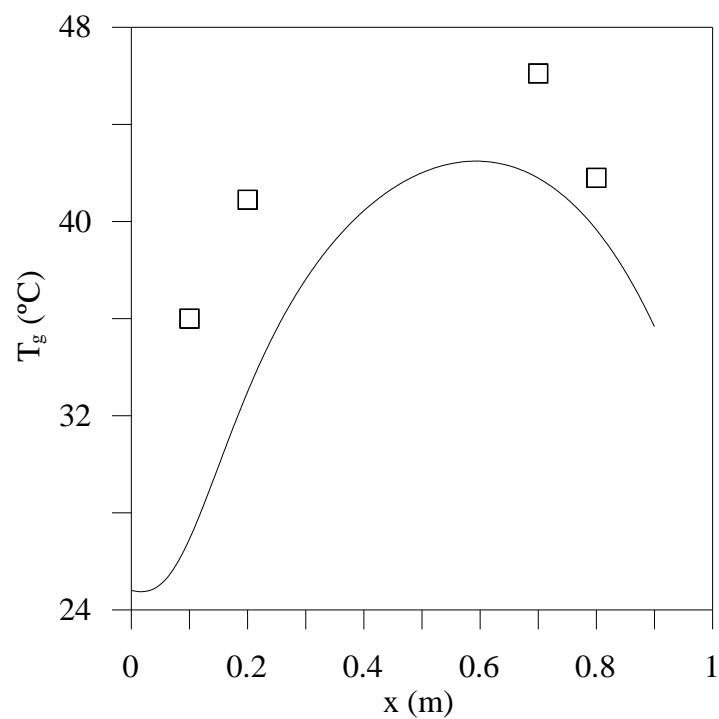


Figura 35. Comparação entre resultados experimentais (símbolos) e simulados (curvas) para a temperatura do gás na secagem da erva-mate em um leito de 0,15 m do Experimento 2.

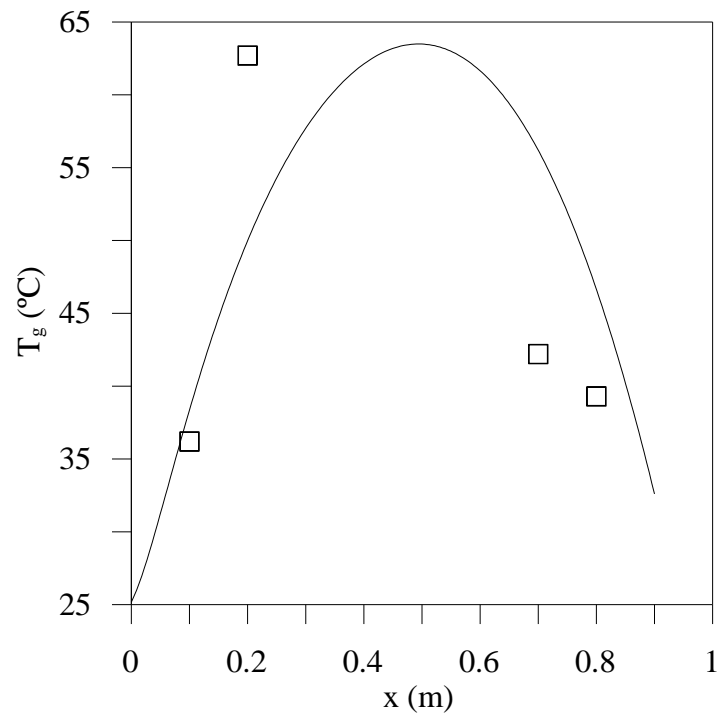


Figura 36. Comparação entre resultados experimentais (símbolos) e simulados (curvas) para a temperatura do gás na secagem da erva-mate em um leito de 0,05 m do Experimento 3.

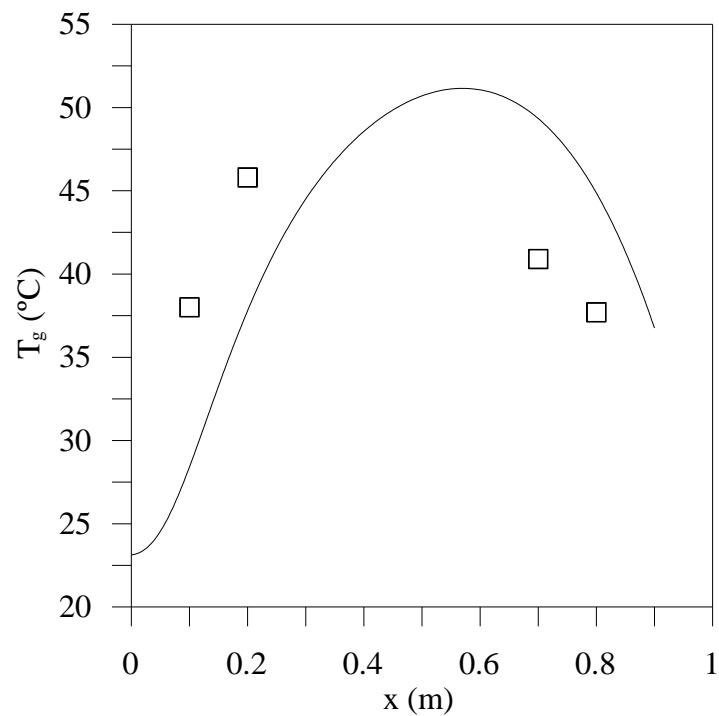


Figura 37. Comparação entre resultados experimentais (símbolos) e simulados (curvas) para a temperatura do gás na secagem da erva-mate em um leito de 0,10 m do Experimento 3.

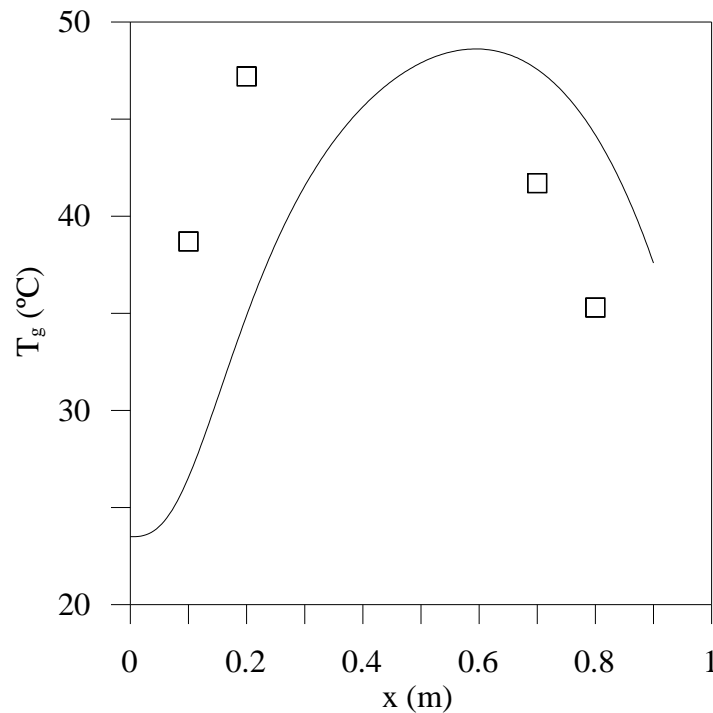


Figura 38. Comparação entre resultados experimentais (símbolos) e simulados (curvas) para a temperatura do gás na secagem da erva-mate em um leito de 0,15 m do Experimento 3.

Nas figuras anteriores foram apresentados todos os resultados para umidade do sólido, temperatura do sólido e temperatura do ar de secagem nas três diferentes temperaturas (39, 47 e 53°C) e espessuras do leito de secagem (0,05, 0,10 e 0,15 m). Entretanto, para evidenciar a validade do modelo, dados de umidade do sólido, da temperatura do sólido e da temperatura do ar de secagem, experimentais e preditos, são reportados na Figura 39. Comparando as três diferentes respostas consideradas, percebe-se que melhores resultados calculados foram obtidos para a umidade do sólido, onde o erro relativo médio foi de apenas aproximadamente 1%. Uma comparação análoga foi realizada para a temperatura do sólido e temperatura do gás, onde erros relativos médios não superiores a 10% foram encontrados, principalmente devido a incertezas nas medições experimentais. No entanto, vale ressaltar que em todos os casos observa-se a inexistência de desvios sistemáticos, o que mais uma vez ressalta a consistência do modelo proposto.

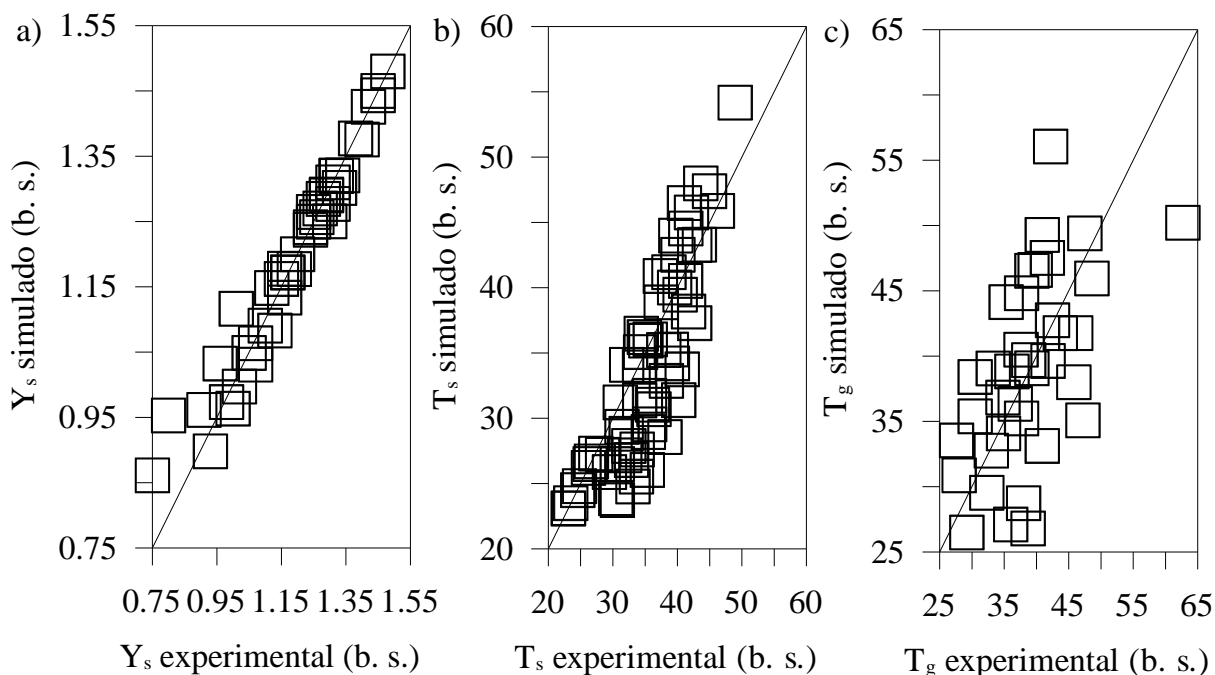


Figura 39. Comparação entre os resultados simulados e experimentais para a umidade do sólido (a), temperatura do sólido (b) e temperatura do gás (c). Símbolos – pontos de encontro entre os resultados simulados e os dados experimentais; Linha contínua – função identidade.

Para evidenciar o efeito da temperatura de alimentação do gás sobre a secagem de erva-mate, as curvas de umidade média do sólido referentes aos Experimentos 1, 2 e 3 referentes a um leito de espessura igual a 0,15 m são consideradas em conjunto na Figura 40. Como esperado, prontamente observa-se que quanto maior a temperatura do gás de alimentação maior a taxa de secagem. Obviamente, este mesmo efeito da temperatura de secagem sobre a umidade do sólido é observado na literatura (DOYMAZ 2013; RODRÍGUEZ et al., 2014; Ah-Hen et al. 2013). Doymaz (2013) estudou as características da secagem da beldroega (*Portulaca oleracea* L.) em secador com leito de espessura 2,9 cm, nas temperaturas do ar de secagem de 50°C, 60°C e 70°C. Rodríguez et al. (2014) por sua vez, modelou a cinética de secagem de tomilho (*Thymus vulgaris* L.) em um secador convectivo com leito de espessura aproximada em 2,99 cm. Em seu trabalho, foi observado que utilizando-se temperaturas de secagem de 60°C e 70°C, o tempo de secagem foi reduzido consideravelmente em 76% e 85%, comparado com o tempo total de secagem à 40°C. Ah-Hen et al. (2013) estudaram a influência das temperaturas do ar a 50°C, 60°C e 70°C na cinética de secagem de murta (*Ugni molinae* Turcz) sob regime permanente em leito de

camada delgada. Mais uma vez foi observado que maiores temperaturas do ar de secagem, diminui o tempo e aumentam as taxas de secagem.

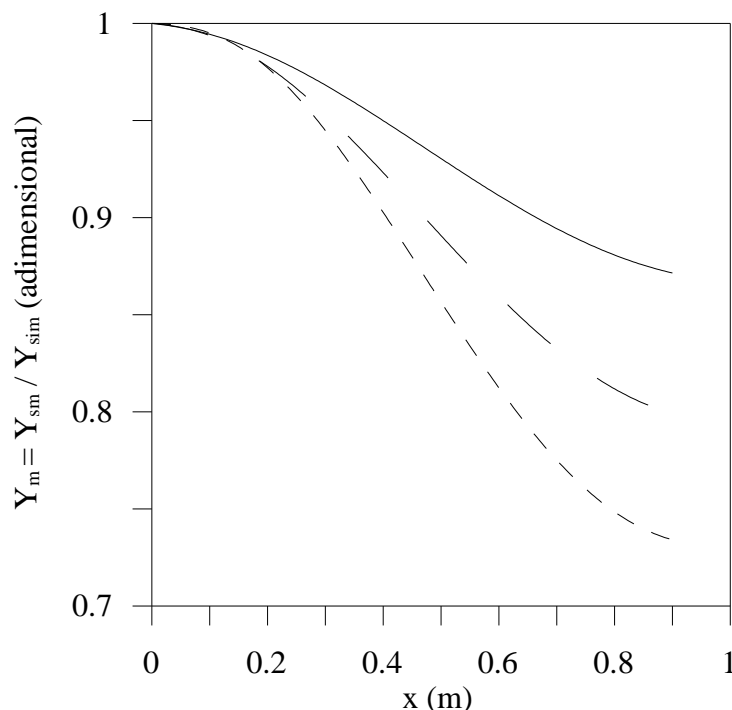


Figura 40. Variação da umidade da erva-mate no leito de 0,15 m. Linha contínua – Experimento 1 ( $T$  média do gás=39°C); Linha tracejada grande – Experimento 2 ( $T$  média do gás=47°C); Linha tracejada pequena – Experimento 3 ( $T$  média do gás=53°C).

O efeito da espessura do leito sobre a umidade do sólido é mais claramente expresso na Figura 41, a qual apresenta a variação da umidade da erva-mate nos leitos de 0,05, 0,10 e 0,15 m nas condições do Experimento 2. Enquanto no leito de 0,05 m foi perdido 28% da umidade presente nas folhas do mesmo, no leito de 0,10 m se observou uma perda de 24% e no de 0,15 m por sua vez, somente 20%. Em resumo, a espessura do leito afeta negativamente a redução da umidade das folhas, o que significa que quanto maior a espessura do leito menor a taxa média de secagem. Isso ocorre porque à medida que o ar de secagem atravessa o leito, o mesmo perde calor e recebe soluto da fase sólida, diminuindo o coeficiente efetivo de transporte de massa e contribuindo para o aumento da umidade de equilíbrio, ambos aspectos com impacto negativo na taxa de secagem.

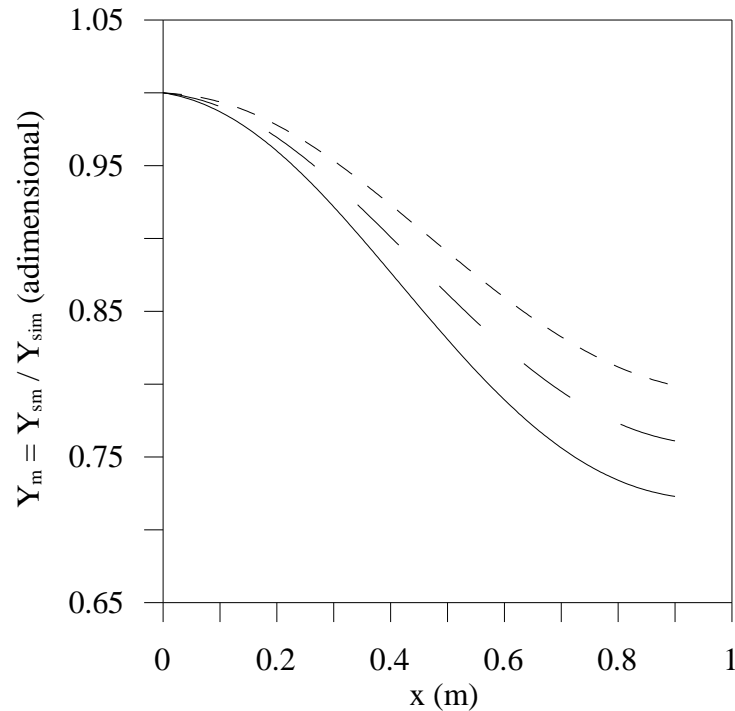


Figura 41. Variação da umidade da erva-mate submetida às condições do Experimento 2. Linha contínua – Leito de espessura 0,05 m; Linha tracejada grande – Leito de 0,10 m; Linha tracejada curta – Leito de 0,15 m.

As Figuras 43 e 44, que diferem somente no que se refere a umidade inicial e de alimentação, apresentam os resultados de umidade média do sólido na saída do secador frente a perturbações no processo de secagem, em particular devido a alterações na velocidade da esteira (ver Figura 42). Novamente é possível verificar que o modelo proposto é capaz de representar a secagem mesmo quando esta ocorre em regime transiente, o que tem importância fundamental para propósitos de controle.

Ainda que a variação de umidade com o tempo apresente um comportamento aparentemente estranho, os resultados são coerentes e explicáveis de maneira relativamente simples. Uma fase inicial de secagem (a velocidade aproximadamente constante) ocorre entre o tempo zero e 3000 s, quando a esteira encontrava-se desligada. Esta fase reporta a variação de umidade do material estacionado na extremidade de saída do secador. O segundo período de secagem, onde a umidade é reduzida e aumentada drasticamente, ocorre entre 3000 e 3593 s, quando a esteira encontrava-se a uma velocidade de  $1,518 \times 10^{-3} \text{ m s}^{-1}$ . A redução de umidade ocorre por que nos primeiros instantes deste ciclo mede-se a umidade do lote inicialmente inserido na esteira, o qual permaneceu por aproximadamente 3000 s em uma região próxima ao centro da câmara de secagem, onde a temperatura era mais elevada. O

aumento de umidade decorre da descarga do material que encontrava-se inicialmente na extremidade de alimentação do secador, o qual encontrava-se em temperaturas inferiores às das do centro da esteira. Na sequência do experimento, que ocorre aproximadamente entre 3593 e 5441 s, onde a velocidade da esteira era aproximadamente  $4,87 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$  a umidade volta a ser reduzida a uma taxa aproximadamente constante. Isto ocorre porque o material contido na esteira em 3593 s é submetido a uma idêntica condição de secagem, apesar dos gradientes de temperatura longitudinais da fase gás. Entre 5441 s e 10841 s a esteira encontra-se desligada e o material que encontrava-se na extremidade de descarga do secador tem sua umidade reduzida de forma estável e branda, pois a temperatura de secagem é baixa nas extremidades. A partir de 10841 s repete-se o ciclo evidenciado entre 3593 s e 5441 s pois novamente adotam-se velocidades iguais a  $1,518 \times 10^{-3} \text{ m s}^{-1}$  (de 10841 até 11434 s) e  $4,87 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$  (de 11434 até 13282 s).

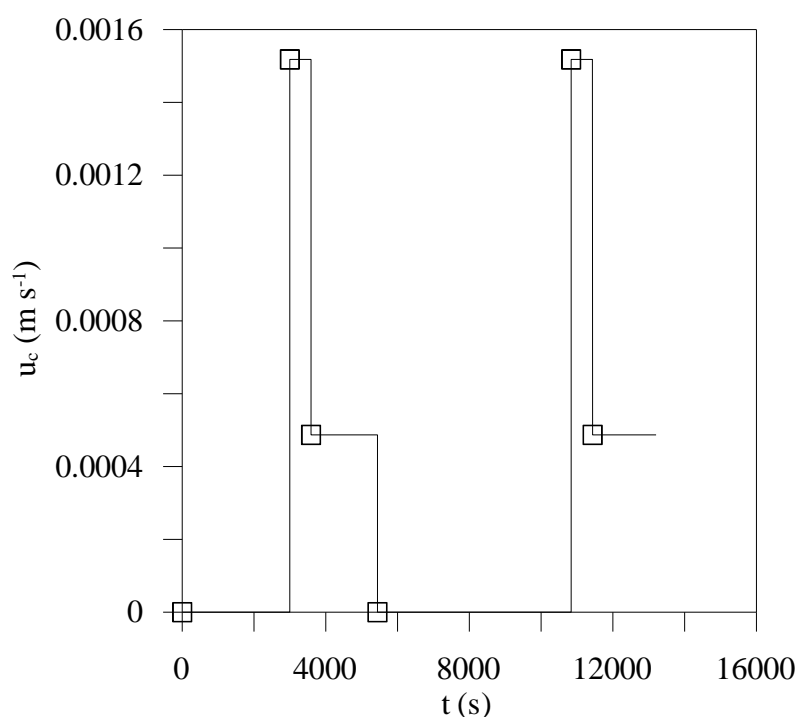


Figura 42. Variação da velocidade da correia ao longo do tempo de secagem. Os símbolos representam o exato momento em que ocorreu a troca do leito ou a pesagem do mesmo.



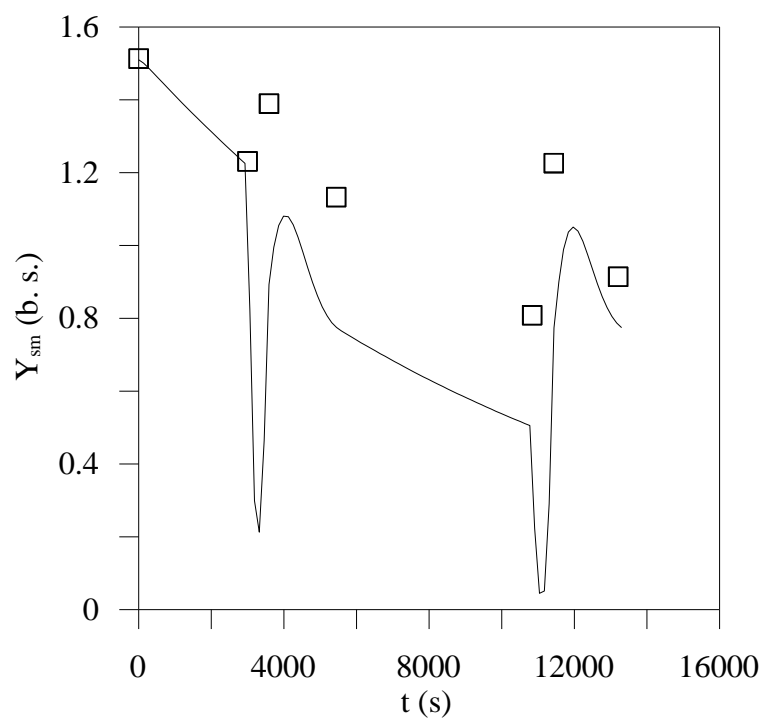


Figura 43. Comparação entre a umidade do sólido estimada (curva) e experimental (símbolos) no Experimento 1 da secagem em regime transiente.

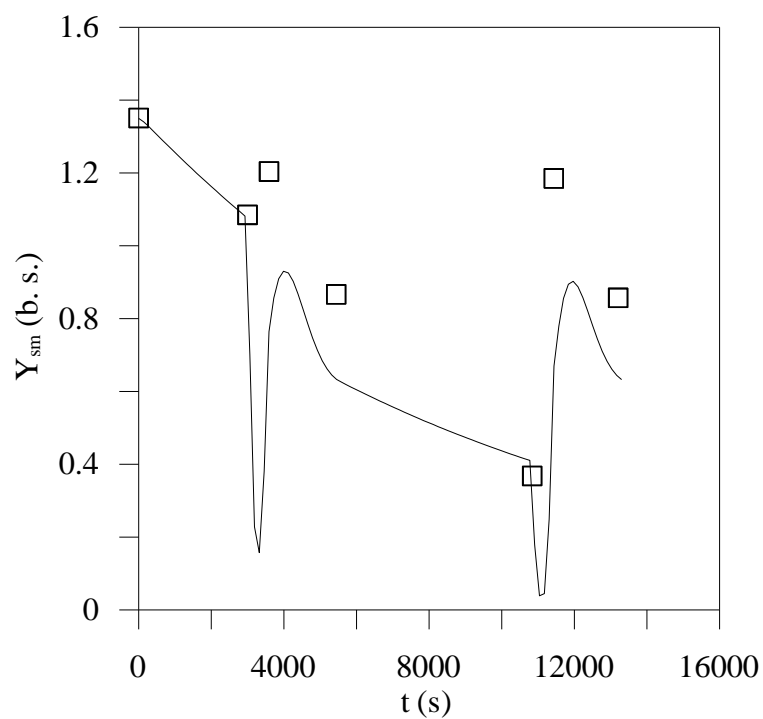


Figura 44. Comparação entre a umidade do sólido estimada (curva) e experimental (símbolos) no Experimento 2 da secagem em regime transiente.

## 5 CONCLUSÃO

Um modelo fenomenológico para secagem de erva-mate em um secador de esteira não-isotérmico, de camada espessa foi proposto. O modelo foi validado com resultados experimentais obtidos em um típico intervalo de variação de umidade de alimentação de folhas de erva mate ( $\approx 1,3$ – $1,5$  base seca) para variações consideráveis na temperatura média de secagem ( $\approx 39$ – $73^{\circ}\text{C}$ ) e espessura do leito ( $\approx 0.05$ – $0.15$  m). Um importante aspecto a ser ressaltado é que a variação das propriedades do sólido e do ar em função dos fatores examinados foi sempre bem descrita e explicada pelo modelo sem a necessidade de ajuste de qualquer parâmetro. De um ponto-de-vista prático, o modelo pode portanto ser aplicado para propósitos de otimização e controle de umidade em plantas reais de manufatura de erva-mate sem qualquer restrição, o que certamente teria grande impacto na economia de energia e padronização deste importante produto.

## REFERÊNCIAS

ABITANTE, A. L. **Modelagem dinâmica e análise de um sistema de controle de umidade de folhas de erva-mate em secadores contínuos de esteira**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Paraná, Paraná.

AH-HEN, K.; ZAMBRA, C. E.; AGÜERO, J. E.; VEJA-GÁLVEZ, A.; LEMUS-MANDACA, R. Moisture Diffusivity Coefficient and Convective Drying Modelling of Murta (*Ugni molinae* Turcz): Influence of Temperature and Vacuum on Drying Kinetics. **Food and Bioprocess Technology**, v. 6, n. 4, p. 919-930, 2013.

BALZAN, S.; HERNANDES, A.; REICHERT, C. L.; DONADUZZI, C.; PIRES, V. A.; GASPAROTTO JUNIOR, A.; CARDOZO, E. L. Lipid-lowering effects of standardized extracts of *Ilex paraguariensis* in high-fat-diet rats. **Fitoterapia**, v. 86, p. 115-122, 2013.

BASTOS, D. H. M.; OLIVEIRA, D. M. de; MATSUMOTO, R. L. T.; CARVALHO, P. O.; RIBEIRO, M. L. Yerba mate: Pharmacological properties, research and biotechnology. **Medicinal and Aromatic Plant Science and Biotechnology**, v. 1, n. 1, p. 37–46, 2007.

BASTOS, D. H. M.; FORNARI, A. C.; QUEIROZ, Y. S. de; SOARES, R. A. M.; TORRES, E. A. F. S. The Chlorogenic Acid and Caffeine Content of Yerba Maté (*Ilex paraguariensis*) Beverages. **Acta Farmacéutica Bonaerense**, v. 25, n. 1, p. 91-95, 2005.

BERTÉ, K. A. S.; BEUX, M. R.; SPADA, P. K. W. D. S.; SLAVADOR, M.; HOFFMANN-RIBANI, R. Chemical Composition and Antioxidant Activity of Yerba-Mate (*Ilex paraguariensis* A.St.-Hil., Aquifoliaceae) Extract as Obtained by Spray Drying. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 59, n. 10, p. 5523–5527, 2011.

BRACESCO, N.; SANCHEZ, A. G.; CONTRERAS, V.; MENINI, T.; GUGLIUCCI, A. Recent advances on *Ilex paraguariensis* research: Minireview. **Journal of Ethnopharmacology**, v. 136, n. 3, p. 378–384, 2011.

BURRIS, K. P.; HARTE, F. M.; DAVIDSON, P. M.; STEWART, C. N.; ZIVANOVIC, S. Composition and bioactive properties of yerba-mate (*Ilex paraguariensis* A. St-Hil.): A review. **Chilean Journal of Agricultural Research**, v. 72, p. 268-274, 2012.

CALÇADA, L. A.; BISCAIA, Jr. E.; MASSARINI, G. Modelagem e simulação de secadores em leito fixo. XXI ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS, p. 384-395, 1993, Ouro Preto.

COSTA, S. G. A Erva-mate. Curitiba: Secretaria de Estado do Planejamento e Coordenação Geral, Scientia et Labor, 1989. 86 p.

CROCE, D. M. da. Características físico-químicas de extratos de erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil) no estado de Santa Catarina. **Ciência Florestal**, v. 12, n. 2, p. 107-113, 2002.

DOYMAZ, I. Hot-air drying of purslane (*Portulaca oleracea* L.). **Heat and Mass Transfer**, v. 49, n. 6, p. 835–841, 2013.

EFING, L. C.; CALIARI, T. K.; NAKASHIMA, T.; FREITAS, R. J. S. de. Caracterização química e capacidade antioxidante da erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.). **Boletim do CEPPA**, v. 27, n. 2, p. 241-246, 2009.

EICHOL, E. D.; PERES, W. B. Monitoramento da qualidade física de secagem de sementes de milho em secadores estacionários. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 30, n.2, p.57-64, 2008.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Cultivo de erva-mate. Embrapa Florestas – Sistema de Produção, 2010. Disponível em <[http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Erva-mate/CultivodaErvaMate\\_2ed/Importancia.htm](http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Erva-mate/CultivodaErvaMate_2ed/Importancia.htm)>. Acessado 24/04/2013.

ESMELINDRO, M.C.; TONIAZZO, G.; WACZUK, A.; DARIVA, C.; OLIVEIRA, D. de. Caracterização físico-química da erva mate: Influência das etapas do processamento industrial. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.22, n.2, p.193-204, 2002.

GARCÍA-PERÉZ, J. V.; CARCEL, J. A.; GARCÍA-ALVARADO, M. A.; MULET, A. Simulation of grape stalk deep-bed drying. **Journal of Food Engineering**, v. 90, n. 2, p. 308-314, 2009.

HALLAJISANI, A.; SHAHBEIG, H.; HASHEMI, S. J.; DOUGLAS, W. J. M. An experimental simulation model for coated paper drying. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 30, n. 3, p. 563-573, 2013.

HALLOY, S.; REID, M. J. Growing yerba mate. GRIFFITHS, G.; TAIT, A.; WRATT, D.; JESSEN, M.; MACLEOD, M.; REID, J.; ANDERSON, J.; PORTER, N.; HALLOY, S.; RICHARDSON, A. Use of Climate, Soil, and Crop Information for Identifying Potential Land-Use Change in the Hokianga and Western Kaipara Region. Wellington, New Zealand: Naiwa, 2003. P. 88-97.

HARCHEGANI, M. T.; MOHEB, A.; SADEGHI, M.; TOHIDI, M.; NAGHAVI, Z. Experimental study of deep-bed drying kinetics of rough rice. **Agricultural Engineering International**, v. 14, n. 4, p. 195-202, 2012.

HECK, C. I.; MEJIA, E. G. de. Yerba Mate Tea (*Ilex paraguariensis*): A Comprehensive Review on Chemistry, Health Implications, and Technological Considerations. **Journal of Food Science**, v. 72, n. 9, p. 138-151, 2007.

HELDMAN, D. R.; LUND, D. B. Handbook of Food Engineering, 2nd ed. CRC Press, 2007.

HENDERSON, S. M.; PABIS, S. Grain drying theory I: temperature effect on drying coefficient. **Journal of Agriculture Engineering Research**, v.6, n. 3, p. 169-174, 1969.

HOFMANN, A. M. da S.; BENINCÀ, C.; KOTOVICZ, V.; ZANOELO, E. F. Experiments, Modeling and Control of a Dryer-Cooler of Expanded Raw Soybean Flakes in a Hexane Extraction Plant. **Journal of the American Oil Chemists' Society**, v. 89, n. 10, p. 1929- 938, 2012.

HOLMAN, J. P. Transferência de Calor, McGraw-Hill, 1983.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Sala de Imprensa. Disponível em <<http://saladeimprensa.ibge.gov.br/noticias?view=noticia&id=1&busca=1&idnoticia=2281>>. Acessado 24/04/2013.

JAYAS, D. S.; CENKOWSKI, S.; PABIS, S.; MUIR, W. E. Review of thin-layer drying and wetting equations. **Drying Technology**, v. 9, n. 3, p. 551-588, 1991.

JENSEN, S., MELEIRO, L. A. C., & ZANOELO, E. F. Soft-sensor model design for 10 control of a virtual conveyor-belt dryer of mate leaves (*Ilex paraguariensis*). **Biosystems Engineering**, v. 108, n. 11, p. 75–85, 2011.

KAYA, A.; AYDIN, O. An experimental study on drying kinetics of some herbal leaves. **Energy Conversion and Management**, v. 50, n. 1, p. 118-124, 2009.

KIRANOUDIS, C. T., BAFAS, G. V., MAROULIS, Z. B., & MARINOS-KOURIS, D. MIMO control of conveyor-belt drying chambers. **Drying Technology**, v. 13, n 1-2, p. 73-97, 1995.

KRAEMER, K. H.; TAKETA, A. T. C.; SCHENKEL, E. P.; GOSMANN, G.; GUILLAUM, D. Matesaponin 5, a highly polar saponin from *Ilex paraguariensis*. **Phytochemistry**, v. 42, n. 4, p. 1119-1122, 1996.

MCCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOTT, P. Unit Operations of Chemical Engineering. 7<sup>th</sup> ed. Nova York: McGraw-Hill, 2005.

MANCINI, M. C.; BISCAIA, JR. E. E MASSARANI, G. Estudo de Coeficiente de Transferência de Massa na Secagem de Grãos em Leito Deslizante e Fluxos cruzados. XXI ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS, p. 396-406, 1993, Ouro Preto.

MANDAS, N., HABTE, M. Numerical simulation static-bed drying of barley. **Biosystems Engineering**, v. 82, n.3, p. 313-319, 2002.

MARTINELLO, M. A., MUÑOZ, D. J., GINER, S. A. Mathematical modelling of low temperature drying of maize: comparison of numerical methods for solving the differential equations. **Biosystems Engineering**, v. 114, n. 2, p. 187–194, 2013.

MAZUCHOWSKI, J. Z. Manual da Erva-Mate (*Illex paraguariensis* St. Hill.). Curitiba: Empresa Paranaense de Assistência Técnica e Extensão Rural, 2ª ed., 1991. 104 p.

MENEGHETTI, V. L.; AOSANI, E.; ROCHA, J. C. da; OLIVEIRA, M. de; ELIAS, M. C., POHNDORFR, S. Modelos matemáticos para a secagem intermitente de arroz em casca. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 10, p. 1115-1120, 2012.

MORAIS, E. D. de; STEFANUTO, A.; KLEIN, G. A.; BOAVENTURA, B. C. B.; ANDRADE, F. de; WAZLAWIK, E.; PIETRO, P. F. di; MARASCHIN, M.; SILVA, E. L. da. Consumption of Yerba Mate (*Illex paraguariensis*) Improves Serum Lipid Parameters in Healthy Dyslipidemic Subjects and Provides an Additional LDL-Cholesterol Reduction in Individuals on Statin Therapy. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 57, n. 18, p. 8316–8324, 2009.

MUJUMDAR, A. S. Handbook of Industrial Drying, 3rd ed. CRC Press, 2006. 1312 p.

PANCHARIYA, P. C., POPOVIC, D., SHARMA, A. L. Thin-layer modelling of black tea drying process. *Journal of Food Engineering*, v. 52, n. 4, p. 349–357, 2002.

PINHEIRO, M. A.; CAMARGO, P. S. de Jr.; CHWIF, L. Aplicação de ferramentas de simulação no curso de MBA Gestão de Operações da Fundação Carlos Alberto Vanzolini: ponto de vista discente. ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 2005, Porto Alegre.

PUANGPRAPHANT, S. ; DIA, V ; DE MEJIA, E. G. ; GARCIA, G. ; BERHOW, M. A.; WALLIG, M. A. Yerba mate tea and mate saponins prevented azoxymethane-induced inflammation of rat colon through suppression of NF- $\kappa$ B p65ser(311) signaling via IB- and GSK-3 reduced phosphorylation. **Biofactors**, v. 39, n. 4, p. 430-440, 2013.

REIS, R. C.; DAVILLA, I. A.; ASCHERI, D. P. R.; SERVULO, A. C. O.; SOUZA, A. B. M. Kinetics of drying of basil leaves (*Ocimum basilicum* L.) in the infrared. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 12, p. 1346-1352, 2012.

REISSMANN, C. B.; RADOMSKI, M. I.; QUADROS, R. M. B. de. Chemical Composition of *Ilex paraguariensis* St. Hil. Under Different Management Conditions in Seven Localities of Paraná State. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 42, n. 2, 1999.

RODRÍGUEZ, J.; CLEMENTE, G. SANJUÁN, N.; BOM, J. Modelling drying kinetics of thyme (*Thymus vulgaris* L.): Theoretical and empirical models, and neural networks. **Food Science and Technology International**, v. 20, p. 13-22, 2014.

SACILIK, K.; UNAL, G. Dehydration Characteristics of Kastamonu Garlic Slices. **Biosystems Engineering**, v. 92, n. 2, p. 207-215, 2005

SCHMALKO, M. E.; MORAVICKI, R. O.; RAMALLO, L. A. Simultaneous Determination of Specific Heat Capacity and Thermal Conductivity Using the Finite-difference Method, **Journal of Food Engineering**, v. 31, p. 531-540, 1997.

SCHMALKO, M. E.; PERALTA, J. M.; ALZAMORA, S. M. Modeling the drying of a deep-bed of *Ilex paraguariensis* in an industrial belt conveyor dryer. **Drying Technology**, v. 25, n. 12, p. 1967–1975, 2007.

SEAB/DERAL – Secretaria de Estado da Agricultura e do Abastecimento/ Departamento de Economia Rural. Produtos florestais – Erva-mate, 2013. Disponível em: <[http://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&frm=1&source=web&cd=6&ved=0CEkQFjAF&url=http%3A%2F%2Fwww.agricultura.pr.gov.br%2Fmodules%2Fqas%2Fuploads%2F3568%2Ferva\\_mate\\_14\\_ago\\_2013.pdf&ei=G-awUruHOIqwsQS6m4CQBg&usg=AFQjCNEzNUUUcJVqidEgZTesob9qA6gXNg](http://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&frm=1&source=web&cd=6&ved=0CEkQFjAF&url=http%3A%2F%2Fwww.agricultura.pr.gov.br%2Fmodules%2Fqas%2Fuploads%2F3568%2Ferva_mate_14_ago_2013.pdf&ei=G-awUruHOIqwsQS6m4CQBg&usg=AFQjCNEzNUUUcJVqidEgZTesob9qA6gXNg)>. Acessado 17/12/2013.

SHARP, J. R. A review of low temperature drying simulation models. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 27, n. 3, p. 169–190, 1982.



SINGH, P. R.; E HELDMAN, R. D. Introduction to Food Engineering, Academic Press, Second Edition, 1993.

SOUZA, L. M. DE; DARTORA, N.; SCOPARO, C. T.; CIPRIANI, T. R.; GORIN, P. A. J.; IACOMINI, M.; SASSAKI, G. L. Comprehensive analysis of maté (*Ilex paraguariensis*) compounds: Development of chemical strategies for matesaponin analysis by mass spectrometry. **Journal of Chromatography A**, v. 1218, n. 41, p. 7307–7315, 2011.

SOYSAL, Y.; ÖZTEKIN, S.; EREN, Ö. Microwave drying of parsley: Modelling, kinetics, and energy aspects. **Biosystems Engineering**, v. 93, n. 4, p. 403-13, 2006.

SRIVASTAVA, V. K.; JOHN, J. Deep bed grain drying modeling. **Energy Conversion and Management**, v. 43, n. 13, p. 1689-1708, 2002.

TUSSOLINI, L., OLIVEIRA, J. S., FREIRE, F. B., FREIRE, J. T., ZANOELO, E. F. Thin layer drying of mate leaves (*Ilex paraguariensis*) in a conveyor-belt dryer: a semi automatic control strategy based on a dynamic model. **Drying Technology**, 2014, DOI: 10.1080/07373937.2014.900504.

VALDUGA, E.; FREITAS, R. J. S. de; REISSMANN, C. B.; NAKASHIMA, T. Caracterização química da folha de *Ilex paraguariensis* St. Hil. (erva-mate) e de outras espécies utilizadas na adulteração do mate. **Boletim do CEPPA**, v. 15, n. 1, p. 25-36, 1997.

VAN DELFT, T. J. **Modeling and model predictive control of a conveyor-belt dryer applied to the drying of fish feed**. 2010. Dissertação - Norwegian University of Science and Technology, Oslo, Norway.

ZANOELO E. F., CARDOZO FILHO L., NASCIMENTO FILHO I., CARDOZO JÚNIOR E.L. Um Novo Conceito de Processo para a Indústria Ervateira. 3º CONGRESSO SUL AMERICANO DE ERVA-MATE, v. 6, p. 1-6, 2003, Chapecó.

ZANOELO, E. F. Equilibrium Moisture Isotherms for Mate Leaves. **Biosystems Engineering**, v. 92, n. 4, p. 445-452, 2005.

ZANOELO, E. F.; di CELSO, G. M.; KASKANTZIS, G. Drying Kinetics of Mate Leaves in a Packed Bed Dryer. **Biosystems Engineering**, v. 96, n. 4, p. 487-494, 2007.

ZANOELO, E. F. A Theoretical and Experimental Study of Simultaneous Heat and Mass Transport Resistances in a Shallow Fluidized Bed Dryer of Mate Leaves. **Chemical Engineering and Processing**, v. 46, p. 1364-1375, 2007.

ZANOELO, E. F., ABITANTE, A., MELEIRO, L. A. C. Dynamic modeling and feedback control for conveyors-belt dryers of mate leaves. **Journal of Food Engineering**, v. 84, p. 458-468, 2008.

ZANOELO, E. F., BENINCÁ, C., RIBEIRO, E. Thermophysical properties of mate leaves: experimental determination and theoretical effect of moisture content. **Journal of Food Process Engineering**, v. 34, n. 6, p. 2124–2136, 2011.

ZARE, D.; CHEN G. Evaluation of a simulation model in predicting the drying parameters for deep-bed paddy drying. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 68, p. 78-87, 2009.

ZARE, D., JAYAS, D. S., SINGH, C. B. A generalized dimensionless model for deep bed drying of paddy. **Drying Technology**, v. 30, n. 1, p. 44–51, 2012.